



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

UNIDADE ARAXÁ

TIAGO MOZART GONÇALVES LEITE

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAVA FINAL:  
LERCHS GROSSMANN VS. SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS**

ARAXÁ/MG

2017

TIAGO MOZART GONÇALVES LEITE

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAVA FINAL:  
LERCHS GROSSMANN VS. SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais- CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Professora Me. Silvânia Alves Braga.

Coorientador: Professor Me. Guilherme Alzamora Mendonça.

ARAXÁ/MG

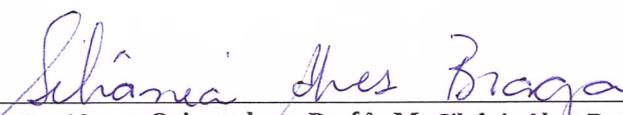
2017

TIAGO MOZART GONÇALVES LEITE

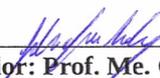
**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAVA FINAL:  
LERCHS GROSSMANN VS. SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais- CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

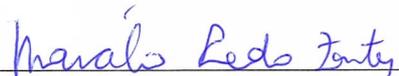
Araxá, 23 de junho de 2017.

  
\_\_\_\_\_

**Presidentee Orientadora: Prof.<sup>a</sup> . Me.Silvânia Alves Braga**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

  
\_\_\_\_\_

**Coorientador: Prof. Me. Guilherme Alzamora Mendonça**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

  
\_\_\_\_\_

**Membro Titular: Prof. Me. Marcelio Prado Fontes**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

  
\_\_\_\_\_

**Membro Titular: Prof.<sup>a</sup> Bruna Letícia dos Santos**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

*A minha mãe e ao meu padrasto,  
a minha família,  
aos meus irmãos.*

*“Se cheguei até aqui foi porque me apoiei em ombro dos gigantes”*

*Isaac Newton*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela força, por me abençoar todos os dias e por me dar a dádiva da vida.

A minha mãe, por fazer um papel duplo de mãe e pai todos os dias e por estar sempre ao meu lado me incentivando e orientando durante toda a vida. Por ter me ensinado a nunca desistir dos meus sonhos e ir de encontro aos meus objetivos.

Ao meu padrasto, por me auxiliar nessa longa caminhada.

A minha Irmã, por sempre estar ao meu lado.

Ao meu Padrinho Luciano, por sempre me incentivar e me apoiar em todas as minhas decisões.

Aos meus tios Rogério e Aparecida, por sempre estarem presente nos momentos difíceis.

A todos os meus professores.

Especialmente ao professor Felipe Ribeiro Souza da UFMG, por todo auxílio, paciência, sugestões, pela grande ajuda com o fornecimento de material e por todo o suporte técnico, tornando possível a realização deste trabalho.

Ao meu grande Mestre, Professor Michel Melo Oliveira, pela orientação, pelos conselhos dados, pela amizade, paciência e dedicação que teve durante todo o período em que trabalhamos juntos.

A minha orientadora, Professora Silvânia Alves Braga, pela paciência, orientação e dedicação.

Ao professor Guilherme Alzamora, pelos grandes incentivos, orientação, dedicação e revisão do texto.

Ao Professor Marcélio Prado Fontes, pelo incentivo e pela enorme paciência.

## RESUMO

O estudo para delimitação da cava final de uma mina a céu aberto é uma etapa fundamental para um empreendimento mineiro. Nessa fase tenta-se definir a quantidade de estéril e minério que serão movimentados no projeto, com objetivo de maximizar a rentabilidade econômica do empreendimento. Até o final da década de 60 esse processo de delimitação de uma cava a céu aberto era feito por tentativa e erro, sendo um processo muito moroso e pouco preciso. No cenário atual, softwares de planejamento de lavra são utilizados para se efetuar esse tipo de análise, sendo que os principais programas no cenário da mineração são baseados no algoritmo desenvolvido por Lerchs e Grossmann no ano de 1965. Atualmente, o estado da arte do planejamento de lavra é baseado na metodologia clássica, onde existe uma sequência pré-determinada das atividades: construção do modelo de blocos, delimitação de cava final, construção dos *push-backs*, sequenciamento dos blocos. Esta metodologia determina a cava final considerando o fato inconcebível que todos os blocos serão lavrados no mesmo intervalo de tempo. A evolução da capacidade de armazenamento e velocidade de processamento dos computadores tem disponibilizado novas possibilidades ao planejamento de lavra. Com isso, a técnica do sequenciamento direto de blocos vem crescendo e tornando-se competitiva no mercado. Essa técnica integra todas as etapas e soluciona o problema do planejamento de lavra como um todo, sem a necessidade de divisão do planejamento de lavra em etapas interdependentes. Esse trabalho tem por objetivo comparar essas duas metodologias. Como ferramenta dessa comparação foram utilizados dois softwares distintos, o *software* Micromine, que utiliza o algoritmo de Lerchs e Grossmann (LG) e o *software* Simsched, que apresenta como método de otimização o sequenciamento direto de blocos (SDB). A partir da análise de um corpo de minério fictício, obteve-se um valor presente líquido (VPL) superior de 0,48% para a metodologia do SDB, em relação ao algoritmo de LG. Portanto o SDB foi mais interessante do ponto de vista financeiro. Outro fator observado que pesou a favor do SDB foi o fato de o aproveitamento do corpo de minério se dar em um menor intervalo de tempo (19 anos, contra 25 anos encontrado a partir de LG). Importante ressaltar ainda que houve uma movimentação de estéril 62,12% superior para o SDB.

**Palavras-chave:** planejamento de lavra, cava final, sequenciamento direto de blocos, algoritmo de Lerchs-Grossmann.

## ABSTRACT

The study for delimitate the final pit of an open pit mine is a fundamental step for a mineral development. In that phase, it tries to define the quantity of overburden and ore that will be moved in the project, with the goal of maximizing the economic efficiency of the mineral company. Some time ago, this process of delimitating the mine pit was done by learning with the mistakes, but it was a slowly and imprecise process. In the current days, this job is done by the usage of software, where most of the well-known software in this area is based on the algorithm made by Lerchs & Grossmann in 1965. Nowadays the state of art for mining planning is based in the classic methodology where there is a pre-determined activities sequence: Determination of the final pit, generation of the pushbacks, block sequencing. This method determines the final pit by considering that all the blocks are mine at the same time. The evolution of the computers velocity and capacity has given new possibilities for this area. By that, the direct block sequencing is growing and becoming competitive at the market. This technique applies all the steps and solves the mining scheduling as one process, without the necessity of dividing it into independent steps. The given work has as goal the comparison of these two methods. For the comparison, it were used the software Micromine, which uses the Lerchs & Grossmann's algorithm and the software Simsched, that appear with an optimal method for direct block sequencing. By the analysis of an unreal ore body, it was acquired an Net Present Value of 0.48% for the direct block sequencing method in relation of the Lerchs & Grossmann's algorithm, therefore this results were more interesting in the economical view. Another observed factor, which leads in favor of the direct block sequencing method was that the fact that the exploitation of the ore body were made in a smaller time (19 years, against 25 years acquired with the L&G). It is important to emphasize that it were found an overburden movement of 62.12% bigger for the L&G than the direct block sequencing method.

**Keywords:** mine planning, final pit, direct block sequencing, Lerchs-Grossmann algorithm.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de Blocos em 3D. ....	4
Figura 2: Coordenada do Modelo de Blocos. ....	5
Figura 3: Modelo de blocos com representação da superfície topográfica e geologia. ....	6
Figura 4: Geometria do corpo mineral representado por blocos utilizado por Lerchs e Grossmann em 1965. ....	9
Figura 5: Modelo de blocos inicial valorizado economicamente utilizado por Lerchs e Grossmann em 1965. ....	10
Figura 6: Modelo de blocos final valorizado economicamente utilizado por Lerchs e Grossmann em 1965. ....	10
Figura 7: Soma cumulativa de todas as Colunas. ....	11
Figura 8: Processo de soma realizado em toda seção. ....	12
Figura 9: Determinação do limite da cava final. ....	12
Figura 10: Limite de cava final otimizado superposto ao modelo de blocos. ....	12
Figura 11: Um conjunto de poços aninhados é produzido usando diferentes parâmetros de otimização. ....	15
Figura 12: Resultados do sequenciamento realizado pelo SimSched : Sequenciamento otimizado, no qual superfícies são geradas e cada cor representa um período de lavra. ....	15
Figura 13: Modelo de Blocos e Classificação Mineral. ....	18
Figura 14: classificação dos blocos de minério de acordo com o teor de ferro – visão lateral do bloco. ....	19
Figura 15: Formulário <i>Model</i> preenchido- <i>Pit Optimization</i> . ....	20
Figura 16: Formulário <i>Mining</i> preenchido - <i>Pit Optimization</i> . ....	20
Figura 17: Formulário <i>Processing</i> preenchido - <i>Pit Optimization</i> . ....	21
Figura 18: Formulário <i>Nested Pits</i> preenchido – análise de sensibilidade. ....	22
Figura 19: Formulário <i>General</i> preenchido. ....	23
Figura 20: Formulário <i>Destinations</i> preenchido. ....	25
Figura 21: Formulário <i>operational/constraints</i> preenchido. ....	25
Figura 22: Campo <i>Run Options</i> destinado para configurar quais e como os arquivos serão exportados. ....	26
Figura 23: Tonelagem de minério e estéril em cada cava- Análise de Sensibilidade. ....	28
Figura 24: Variação do valor de valor presente (VP) para cada cava - Análise de Sensibilidade. ....	28
Figura 25: Limite Final de Cava entre as metodologias. ....	30
Figura 26:- Metodologia de LG - Cava final dividida em 25 períodos. ....	31
Figura 27: Metodologia de SDB- Cava final dividida em 19 períodos. ....	31
Figura 28:- Metodologia de LG - Cava final dividida em 25 períodos, Vista em planta. ....	32
Figura 29: Produção pilha de estéril. ....	34
Figura 30: Produção total de material produzido. ....	35
Figura 31: Teor médio de ferro alimentado na usina. ....	37
Figura 32: Teor médio de sílica alimentado na usina. ....	38
Figura 33: Comparativo entre os VPL do Lerchs-Grossmann e SDB. ....	38
Figura 34: Comparativo entre os VPL acumulados do Lerchs-Grossmann e SDB. ....	39

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Características do Modelo de Blocos.....	17
Tabela 2: Parâmetros para cálculo das funções econômicas .....	23
Tabela 3: Resultados - Análise de Sensibilidade .....	27
Tabela 4: Comparação entre as metodologias - Otimização de cava .....	29
Tabela 5: Comparação entre os Métodos – Resultados obtidos com o Sequenciamento de Lavra .....	33
Tabela 6: Comparação entre os Métodos – Resultados obtidos com o Sequenciamento de Lavra .....	35

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	OBJETIVOS .....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1	MODELO DE BLOCOS TRIDIMENSIONAL.....	4
2.1.1	VALOR ECONÔMICO DOS BLOCOS .....	6
2.2	DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DA CAVA FINAL .....	7
2.2.1	FATORES QUE INFLUENCIAM A CAVA FINAL .....	7
2.2.2	TEMPO DE VIDA DE UMA MINA A CÉU ABERTO .....	8
2.2.3	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO DE CAVA FINAL .....	8
2.3	ALGORITMO DE LERCHS-GROSSMANN .....	9
2.4	SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS.....	13
2.5	SOFTWARE MICROMINE.....	14
2.6	SOFTWARE SIMSCHED.....	15
3	METODOLOGIA .....	17
3.1	BANCO DE DADOS .....	17
3.2	IMPORTAÇÃO DO MODELO DE BLOCOS.....	17
3.3	PARAMETRIZAÇÃO DA RESERVA.....	19
3.3.1	METODOLOGIA CLÁSSICA .....	19
3.3.2	SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS.....	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	27
4.1	OTIMIZAÇÃO DA CAVA FINAL .....	27
4.2	SEQUENCIAMENTO DE LAVRA .....	30
5	CONCLUSÃO .....	40
6	REFERÊNCIAS.....	41

## 1 INTRODUÇÃO

A primeira etapa de um empreendimento mineral é determinar a quantidade de minério disponível. Seguido pela definição da fração economicamente viável deste depósito. O limite de extração é definido pela cava. O tamanho e o formato de uma mina a céu aberto são definidos pelos limites da cava no final da sua vida útil e, normalmente, esses limites buscam proporcionar a maximização do valor econômico dos blocos. A cava final representa a fronteira-limite na qual a exploração de um determinado depósito não será mais economicamente viável, definindo os volumes movimentados de minério e estéril (Guimarães, 2007).

O limite de cava baseado na maximização do retorno financeiro dos blocos não é a única forma de resolver o problema. Pode se determinar o limite de cava utilizando a razão entre estéril e minério através de seções, assim como demonstrado no livro *Open Pit Mines* (Hustrulid & Kuchta, 2013). Os limites de cava dependem de fatores de economia e restrições de concepção/produção. A metodologia baseada na maximização dos valores dos blocos permite a parametrização dos limites da cava de acordo com o preço da *commoditie*, supondo que todos os outros fatores são mantidos constantes (Hustrulid & Kuchta, 2013). A cava final também pode ser influenciada por vários parâmetros geotécnicos, geológicos, ambientais, econômicos e tecnológicos, assim uma cava considerada ideal hoje, pode se tornar obsoleta com o passar dos anos, portanto o estudo de delimitação da cava não é definitivo, mas sim dinâmico (Candido, 2012).

O estudo para delimitação da cava final de uma mina a céu aberto é parte importante do projeto de mineração, já que através dele serão tomadas decisões como sequenciamento de lavra, definição da taxa de produção, dimensionamento da usina, etc. Devido à sua relevância a cava final está diretamente relacionada ao valor presente líquido de um projeto de mineração, pois determina o montante mineral economicamente viável.

Até o final da década de 60 esse processo de delimitação de uma cava a céu aberto era feito por tentativas, sendo pouco preciso e demandando muito tempo. A evolução da capacidade de armazenamento e velocidade de processamento dos computadores tem oferecido novas possibilidades ao planejamento de lavra, fornecendo o caminho de melhor rentabilidade econômica (Hustrulid & Kuchta, 2013).

Atualmente, o método mais utilizado, no planejamento de lavra, para representar um corpo mineral é conhecido como modelo de blocos. Primeiramente o corpo mineral é tratado como um grande bloco e posteriormente é dividido em vários blocos de dimensões menores. Esse modelo permite armazenar vários parâmetros técnicos de um depósito mineral que são aliados aos econômicos, tais como: preços de venda de cada produto, custos com a extração e com o beneficiamento e demais operações ligadas ao processo, gerando o valor econômico de cada bloco. Com base nessas informações os métodos computacionais de otimização decidem se o bloco será lavrado ou não e quando o mesmo será lavrado e enviado para o processamento (Candido, 2012).

Normalmente o planejamento de lavra é subdividido em três etapas: curto, médio e de longo prazo. O planejamento de curto prazo determina quais serão as decisões diárias, semanais e trimestrais tomadas pela empresa, atendendo as necessidades operacionais. O planejamento de médio prazo, também conhecido como tático, toma as decisões para um período de até um ano. Já no de longo prazo, as tomadas de decisões são para um futuro mais distante, como, por exemplo, a definição de áreas lavráveis do depósito, determinando quais serão as reservas minerais, tendo como base a capacidade técnica e econômica da empresa. Esses intervalos são flexíveis e podem variar de acordo com a empresa (Araújo, 2008).

Candido (2012) afirma que esses três tipos de planejamento são considerados indispensáveis para o sucesso de qualquer empreendimento de mineração, independentemente do grau de complexidade das operações, do tipo de mineralização ou do porte da empresa.

O estado da arte do planejamento de lavra consiste a seguinte sequência de atividades: determinação de cava final, construção dos *push-backs*, sequenciamento dos blocos. Esta metodologia determina a cava final considerando o fato inverossímil que todos os blocos serão lavrados no mesmo intervalo de tempo. A utilização de diferentes fatores nos preços de venda possibilita a criação dos *push-backs*. Na última etapa os blocos dentro dos *push-backs* serão sequenciados. Esta metodologia não determina o melhor período de lavra do bloco e limita a escavação uma vez que o valor econômico do bloco não é corretamente determinado.

A formulação de sequenciamento direto de blocos utilizada neste trabalho visa sequenciar os blocos e determina o limite de escavação simultaneamente. O valor

econômico de cada bloco é ajustado corretamente, possibilitando determinar o melhor período que o bloco deve ser lavrado com maior assertividade.

## **1.1 OBJETIVOS**

Este trabalho tem como principal objetivo fazer a comparação entre métodos de cálculo de cava final. A proposta desse estudo é submeter informações de um banco de dados que representem um depósito mineral a análise de *softwares* implementados com algoritmos distintos, comparando as diferentes cavas geradas e como essa formatação tem influência direta no valor presente líquido (VPL).

Como ferramenta de comparação entre os métodos de cálculo de cava final serão utilizados o *software* Micromine®, que utiliza o algoritmo de Lerchs Grossmann (LG) e o *software* Simsched®, que apresenta como método de otimização o sequenciamento direto de blocos (SDB).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MODELO DE BLOCOS TRIDIMENSIONAL

Com a evolução da tecnologia computacional e dos modelos matemáticos utilizados no planejamento e projeto de lavra, a modelagem de blocos tornou-se uma ferramenta primordial para engenharia de minas. Essa modelagem representa o corpo mineral por meio de blocos ao invés de seções e armazena, em cada bloco gerado, as informações que serão utilizadas ao longo do processo de lavra (Hustrulid & Kuchta, 2013).

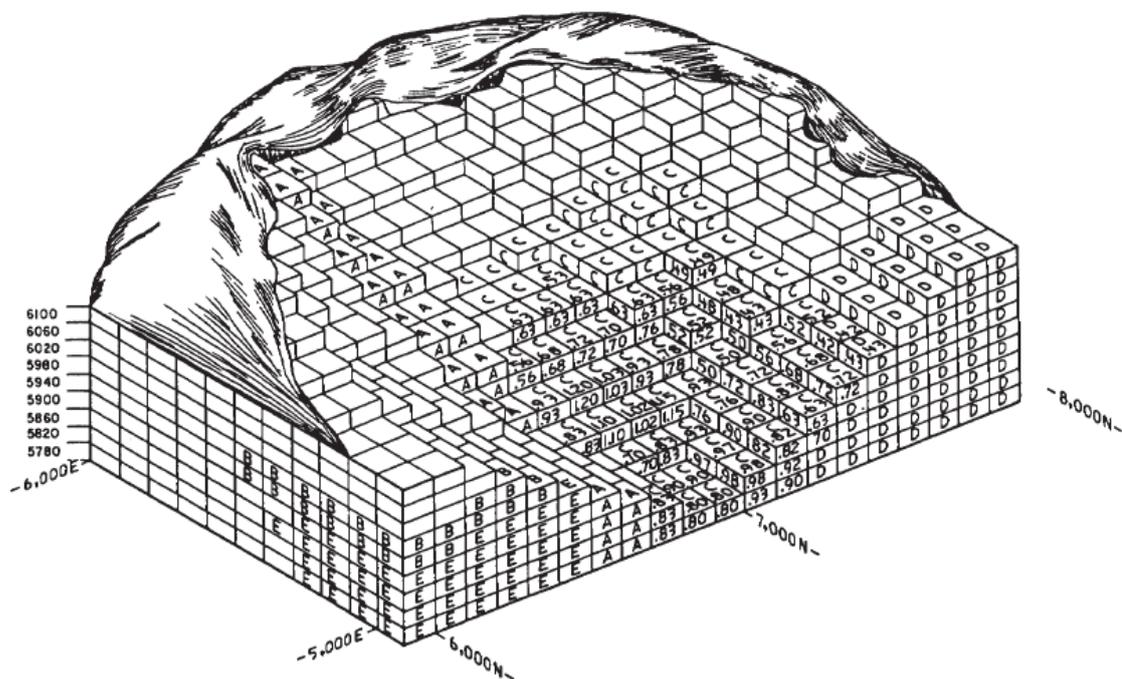


Figura 1: Modelo de Blocos em 3D.

Fonte: (CRAWFORD E DAWEY, 1979 apud HUSTRULID E KUCHTA 2013).

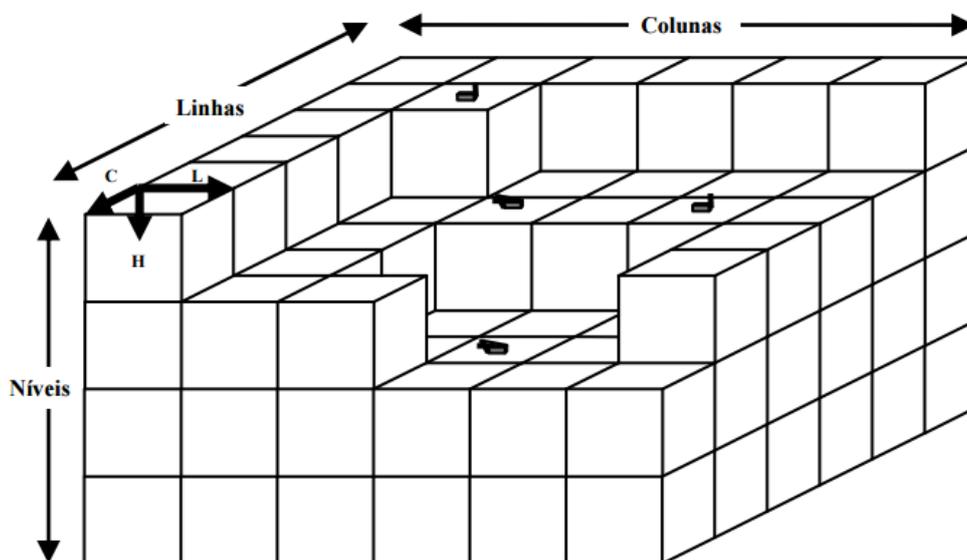
A primeira etapa desse processo é a criação de um bloco tridimensional com dimensões suficientes para cobrir completamente a área mineral de interesse. Esse dimensionamento do bloco de maior tamanho é baseado nas características da mineralização e na gama de informações disponíveis. O grande bloco é subdividido em blocos tridimensionais menores, que podem ser de diferentes dimensões e formatos (SME-AIME, 2011).

Para cada bloco são inseridas na interface do *software* informações relativas à geologia, mecânica das rochas, teor, processamento mineral, custos e preço do minério

no mercado. São atribuídas cores diferentes para cada tipo de bloco, assim, blocos com características semelhantes são representados com a mesma cor (Pinto & Dutra, 2008).

Na maioria dos casos o planejamento de lavra é conduzido por um modelo de blocos regular tridimensional, onde todos os blocos possuem o mesmo formato e dimensões, sendo a altura dos blocos igual à altura da bancada de lavra ou múltiplo dessa medida (SME-AIME, 2011).

Todos os blocos são identificados com coordenadas tridimensionais, representado a linha (L), a coluna(C) e o nível (H). Como apresentado na figura 2.



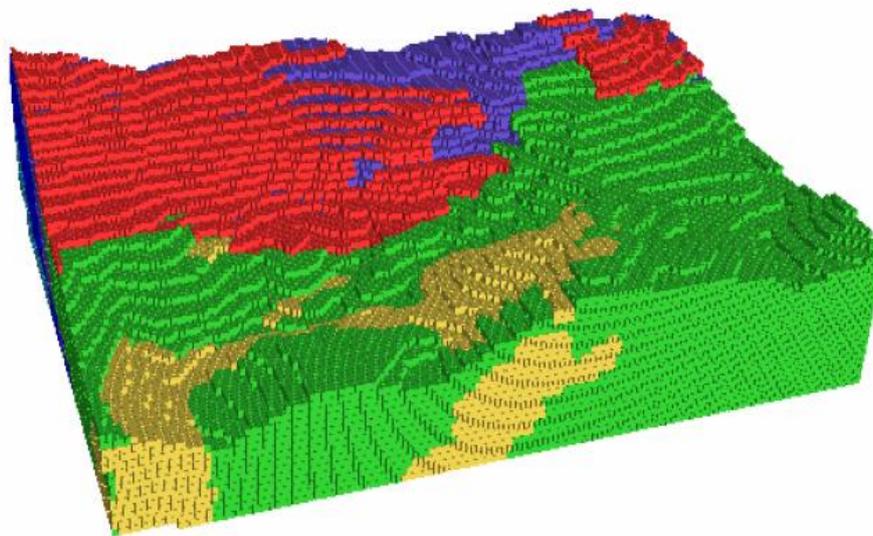
**Figura 2: Coordenada do Modelo de Blocos.**

Fonte: (Amaral & Pinto, 2009).

De modo geral, tratando-se de técnicas de interpolação para atribuição de valores de teor para cada bloco devem ser utilizados (Pinto & Dutra, 2008):

- Geoestatística usando Krigagem;
- Inverso da potência da distância;
- Método dos polígonos.

A figura 3 abaixo representa um modelo de blocos gerado a partir das informações atribuídas para cada bloco.



**Figura 3: Modelo de blocos com representação da superfície topográfica e geologia.**  
**Fonte: (Pinto & Dutra, 2008).**

### 2.1.1 VALOR ECONÔMICO DOS BLOCOS

Calcular corretamente os valores econômicos dos blocos é essencial para qualquer otimização. Se os valores dos blocos estiverem errados, o contorno da cava final otimizada estará errado (SME-AIME, 1990).

Portanto, o desafio do projeto de cava é encontrar um conjunto de blocos que fornecerá o maior valor econômico possível para o empreendimento mineiro, levando em consideração a estabilidade da mina e as restrições à lavra impostas no projeto. Desse modo, o valor econômico de cada bloco é de grande importância para o planejamento (Pinto & Dutra, 2008).

De acordo com Carmo (2001) cada bloco pode ser caracterizado por:

- Renda (R): valor atribuído à venda do bloco;
- Custos Diretos (CD): Custos ligados diretamente ao bloco, perfuração, detonação, carregamento e transporte, entre outros;
- Custos Indiretos (CI): Custos que não podem ser atribuídos diretamente aos blocos, por exemplo, salários de funcionários, compra de equipamentos, manutenção dos mesmos, entre outros.

A partir dessa divisão, é possível calcular o valor econômico de um bloco (VEB):

$$VEB = R - CD \quad (1)$$

O valor econômico do bloco com lucro e o prejuízo não devem ser confundidos. O VEB de um bloco é dado pela diferença entre o valor da renda e os custos diretos, não levando em consideração os custos indiretos dos blocos (Carmo, 2001).

Lucro ou prejuízo pode ser definido como:

$$\text{Lucro ou prejuízo} = \sum VEB - CI \quad (2)$$

Normalmente, os blocos de estéril possuem valores de VEB negativos, pois na maioria das vezes, sua renda é zero. Quando blocos de minério ou blocos que contém minério e estéril (blocos mistos), são analisados, é perceptível que esses blocos terão VEB menor que zero, exatamente zero ou maior que zero, sendo que esse valor será dependente da quantidade e qualidade de minério contido em tais blocos (Carmo, 2001).

Os custos de um projeto mineiro podem variar de acordo com cada empreendimento. Segundo Pinto e Dutra (2008) esses custos da mineração são divididos basicamente em três categorias, sendo elas:

- Custos de capital: São custos relativos aos investimentos feitos na infraestrutura da mina e na planta de processamento do bem mineral.
- Custos operacionais: São os custos vinculados às operações de produção como perfuração, desmonte, transporte, operações de beneficiamento, etc.
- Custos gerais e administrativos: Custos de supervisão, prêmios de empregos, despesas administrativas, levantamento topográfico e geologia de mina, bombeamento, desmonte para desenvolvimento, taxas, seguros, ensaios, depreciação da planta, etc. Normalmente esses custos são considerados em uma base anual.

## **2.2 DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DA CAVA FINAL**

### **2.2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM A CAVA FINAL**

Hartman e Mutmansky (1987) afirmam que minas a céu aberto existem em muitas formas e tamanhos variados. Desse modo, a definição do desenho da cava final é uma parte importante no projeto de mineração, pois é através dela que se determina o quanto de estéril será retirado para que seja possível ter acesso a todo minério que se

deseja lavrar. Essa etapa tem influência direta na economia do projeto, estudos mal realizados nessa etapa podem acarretar grandes prejuízos para empresa.

No momento de definição de um modelo de cava, deve-se procurar aquele que seja otimizado, chamada de cava ótima, que é o de maior valor econômico.

De acordo com Carmo (2001) para que seja possível a definição de uma cava final otimizada é necessário não somente a aplicação de modelos matemáticos otimizantes, mas também é de grande importância a qualidade das informações de entrada, que representam os fatores que afetam o resultado a ser obtido.

Alguns fatores influenciam a cava final de uma mineração, sendo que em cada projeto esse efeito pode variar. Esses fatores são segundo Carmo (2001):

- Mercadológicos;
- Geológicos;
- Geotécnicos;
- Tecnológicos;
- Operacionais;
- Econômicos;
- Ambientais.

### **2.2.2 TEMPO DE VIDA DE UMA MINA A CÉU ABERTO**

Taylor (1977) afirma, conforme citado por Hustrulid e Kuchta (2013, p.515), após analisar diversos projetos, de diferentes tamanhos e formas (além de depósitos pouco espessos e de grande extensão lateral), nos quais as reservas de minério eram razoavelmente conhecidas antes do projeto começar, que o tempo de vida de uma mina pode ser dado pela equação 3.

$$\text{Tempo de vida (em anos)} \cong 0,2 x \sqrt[4]{\text{Tonelagem de Minério esperada}} \quad (3)$$

### **2.2.3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO DE CAVA FINAL**

Visando-se obter a otimização da cava final, deve-se recorrer a ferramentas que proporcionem uma cava ótima. Segundo Flores e Cabral (2008), o limite da cava final ótimo é definido pelo contorno da extração do volume de todo material que maximiza o lucro de um projeto de mineração a céu aberto, satisfazendo as limitações do projeto.

Com o passar dos anos, diferentes métodos tem sido utilizados na mineração para determinar os limites finais da cava, porém dentre as diferentes técnicas propostas, as que alcançaram maior popularidade foram os métodos dos cones flutuantes (PANA E

CARLSON, 1966; DAVID *et al.*, 1974; LEMIEUX, 1979) e o algoritmo de Lerchs - Grossmann (LERCHS E GROSSMANN, 1965). O algoritmo de Lerchs Grossmann foi introduzido no ano de 1965 e desde então tem sido reconhecido como o algoritmo que fornece uma melhor solução para o problema de projeto de cava a céu aberto (Peroni, 2002).

Apesar de bastante usado na indústria da mineração o algoritmo de LG apresenta algumas limitações, como por exemplo, problema de desempenho computacional para modelos com grande número de blocos. Com base nisso, atualmente, vários pesquisadores têm desenvolvido novas técnicas de otimização de cava para serem incorporados em novos softwares (Peroni, 2002).

### 2.3 ALGORITMO DE LERCHS-GROSSMANN

O algoritmo foi proposto em 1965 pelos autores Helmut Lerchs e Ingo F. Grossmann, quando esses publicaram o trabalho intitulado *Optimum design of open pit mines*. Esse algoritmo possui duas abordagens numéricas: uma abordagem bidimensional de cava, utilizando a técnica de programação dinâmica; e a outra abordagem tridimensional derivada da Teoria dos Grafos (Hustrulid & Kuchta, 2013).

Para melhor compreensão do algoritmo será mostrado um exemplo em 2D utilizado no livro *OPEN PIT MINE PLANNING & DESIGN (2013)* adaptado do trabalho de Lerchs e Grossmann.

Para esse exemplo foi considerado um corpo mineral, onde os blocos de estéreis e os blocos de minério apresentam um valor econômico de -\$4 e \$12, respectivamente. Em relação ao talude, foi adotado um ângulo de 35,5 graus e uma relação altura/comprimento de 5/7.

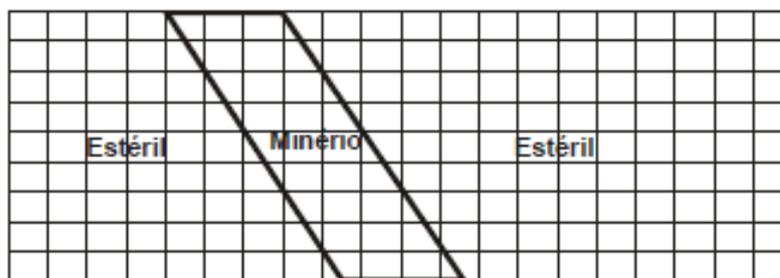


Figura 4: Geometria do corpo mineral representado por blocos utilizado por Lerchs e Grossmann em 1965.  
Fonte: (Peroni, 2002).

O próximo passo foi substituir cada bloco com seu respectivo valor econômico. Como podem ser observados na figura 5 os blocos que limitam o corpo mineral são constituídos tanto de minério quanto de estéril.

-4	-4	-4	-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
	-4	-4	-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
		-4	-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
			-4	-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
				-4	12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
					12	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
						12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
							12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
								12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
									12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
										12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
											12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
												12	-4	-4	-4	-4	-4	-4
													12	-4	-4	-4	-4	-4
														12	-4	-4	-4	-4
															12	-4	-4	-4
																12	-4	-4
																	12	-4
																		12

Figura 5: Modelo de blocos inicial valorizado economicamente utilizado por Lerchs e Grossmann em 1965.  
Fonte: (Peroni, 2002).

Foi utilizado um procedimento de média ponderada para os blocos que continham participação de minério e estéril conforme a figura 6. As posições de cada bloco foram denotadas utilizando um sistema de numeração i, j. De acordo com Lerchs e Grossmann, i refere-se às linhas e j as colunas.

I \ J	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
①	-4	-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
②		-4	-4	-4	-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
③			-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
④				-4	-4	-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑤					-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑥						-4	-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑦							-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑧								-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑨										-4	12	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4

Figura 6: Modelo de blocos final valorizado economicamente utilizado por Lerchs e Grossmann em 1965.  
Fonte: (Peroni, 2002).

Para que seja possível lavrar um bloco em profundidade, devem-se lavrar todos os blocos superiores localizados na mesma coluna. Com base nisso calcula-se o benefício cumulativo ( $M_{ij}$ ) do modelo econômico, para cada coluna de blocos iniciando no topo em direção à base, de acordo com a seguinte equação:

$$M_{i,j} = \sum_{k=1}^i M_{kj} \quad (4)$$

O resultado da soma cumulativa de cada bloco será dado pela soma do próprio bloco com os valores de todos os blocos acima dele. Depois de fazer a soma cumulativa de todas as colunas, o próximo passo é acrescentar uma linha de valores zero no topo do modelo. A figura 7 representa o resultado dessas duas ações.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-4	-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
2	-8	-8	-8	-8	-8	-8	24	24	8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
3	-12	-12	-12	-12	-12	4	32	36	20	-8	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
4				-16	-16	0	32	48	32	0	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16
5					-20	-4	28	56	44	12	-16	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
6						-8	24	56	56	24	-8	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24
7							20	52	64	36	4	-24	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28
8								48	64	48	16	-16	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32
9									60	56	28	-4	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32

Figura 7: Soma cumulativa de todas as Colunas.  
Fonte: (Peroni, 2002).

A próxima etapa é fazer a soma cumulativa geral dos blocos que representam o contorno da cava. Esse processo é iniciado a partir do primeiro bloco do lado esquerdo, movendo-se lateralmente da esquerda para direita, onde três blocos são analisados:

- Um na linha de cima e na coluna à esquerda;
- Um na mesma linha e na coluna à esquerda;
- Um na linha de baixo e na coluna à esquerda.

O procedimento é realizado em todas as colunas do modelo de blocos. Destes três valores analisados para cada bloco, o maior será somado com o bloco original e uma seta é desenhada em sua direção para indicar qual bloco foi escolhido, obtendo-se o  $P_{ij}$ . Esse valor é dado pela seguinte equação:

$$P_{ij} = M_{ij} + \begin{cases} P_{i-1,j-1} \\ P_{i,j-1} \\ P_{i+1,j-1} \end{cases} \quad (5)$$

A figura 8 representa o processo de soma descrito acima feito para todos os blocos.

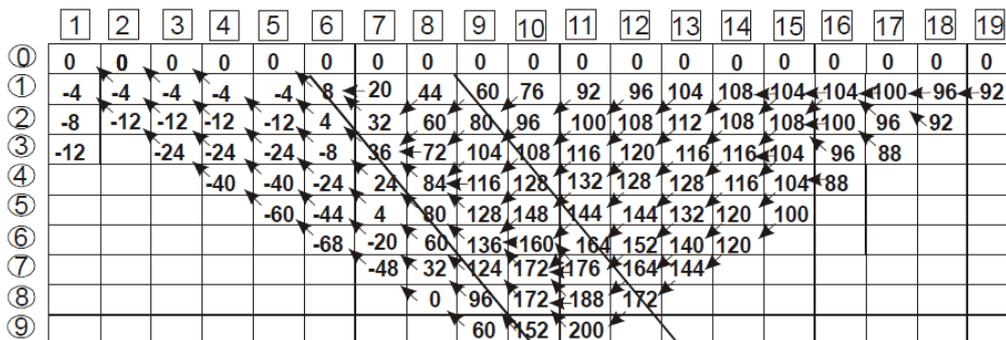


Figura 8: Processo de soma realizado em toda seção.  
Fonte: (Peroni, 2002).

Para determinar o limite da cava final é feita uma análise partindo da primeira linha, da direita para esquerda, procurando o bloco de maior valor econômico. Depois que esse bloco é encontrado, utiliza-se sua posição como referência e seguindo todas as setas, determinando assim o contorno da cava ótima como é mostrado na figura 9.

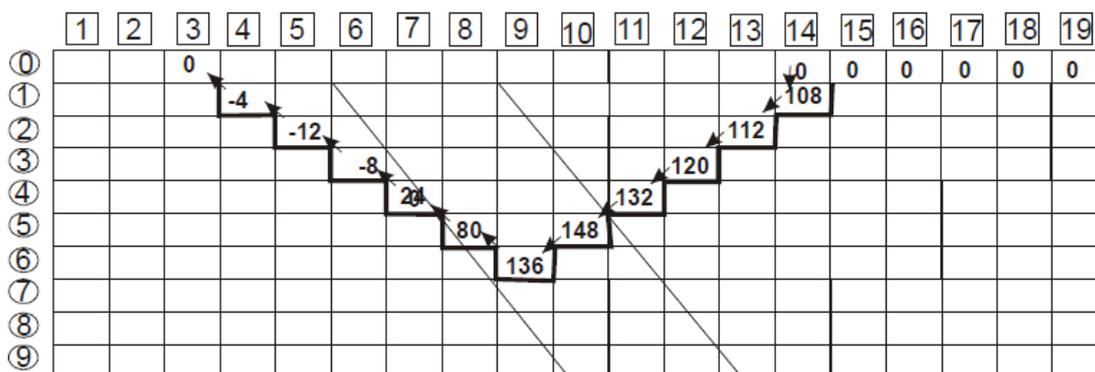


Figura 9: Determinação do limite da cava final.  
Fonte: (Peroni, 2002).

A figura 10 mostra o limite da cava ótima com o valor presente líquido de cada bloco.

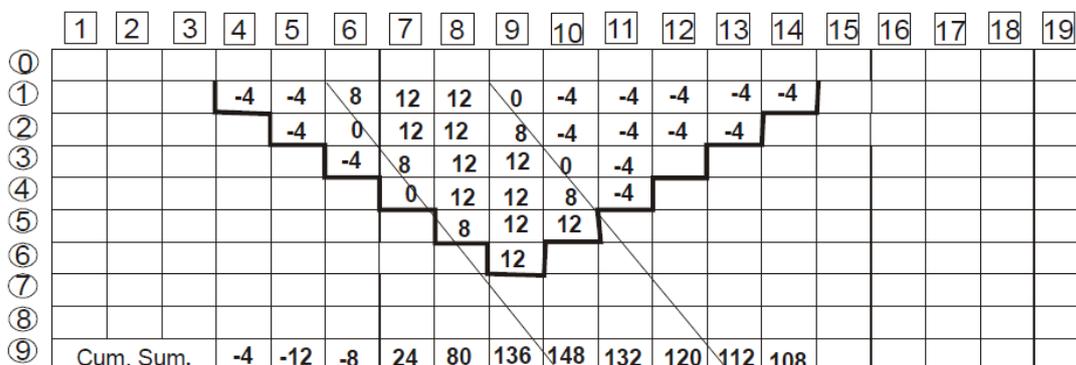


Figura 10: Limite de cava final otimizado superposto ao modelo de blocos.  
Fonte: (Peroni, 2002).

## 2.4 SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS

Guimarães e Marinho (2014) afirmam que na metodologia clássica o planejamento de lavra é obtido a partir de várias etapas encadeadas que são feitas separadamente, como: determinação da cava final, definição das fases de lavra e sequenciamento de lavra. Mesmo que todas essas etapas sejam executadas de maneira ótima, não existe a garantia que o resultado final terá valor econômico ótimo. Diferentemente da metodologia clássica o sequenciamento direto de blocos (SDB) gera um planejamento de lavra otimizado a partir de modelo de blocos sem a necessidade de se passar pelas etapas descritas acima.

Souza (2016), afirma que o algoritmo proposto por Lerchs e Grossmann ao considerar que todos os blocos são lavrados no momento da abertura da mina, aplica uma taxa de desconto errada, pois nesse caso a taxa de desconto para todos os blocos será de 0%. Utilizando o SDB é possível solucionar esse problema, pois nessa nova metodologia cada bloco é tratado no sequenciamento de cava de forma individual.

Segundo Guimarães e Marinho (2014), o sistema é capaz não apenas de decidir quais blocos lavar e quando devem ser lavrados, mas também se o bloco será enviado para usina de processamento ou não. Portanto, através dessa nova metodologia é possível fazer a otimização dos teores de corte concomitantemente com a definição do sequenciamento. Essa etapa é feita de forma ótima, poupando tempo e eliminando do engenheiro em questão a responsabilidade de possuir esse conhecimento avançado na área.

Para que houvesse a determinação de um resultado mais próximo da realidade operacional, Almeida (2013) introduz ao método superfícies que dividem o problema de programação em subproblemas, e são baseadas em aspectos relevantes da engenharia de múltiplos períodos de programação. Os períodos são incluídos da seguinte maneira, primeiro define-se uma solução inicial, então, essa solução vai sendo melhorada a partir de uma estratégia de busca local, baseada na mesma formulação matemática. Essa técnica é utilizada para discretizar a cava em etapas de lavra, que são então consideradas para reduzir a complexidade da otimização da programação de produção anual da lavra (Almeida, 2013).

O modo de construção da função benefício é um importante fator que diferencia o sequenciamento direto de blocos da metodologia clássica. No SDB além de ser

possível a aplicação da variável binária da programação inteira mista, também há possibilidade de usar uma programação baseada em métodos heurísticos, metaheurísticos e relaxação lagrangeada, possibilitando uma maior facilidade da solução dos problemas de programação (Souza, 2016).

Segundo Souza (2016), não existe um único algoritmo capaz de resolver qualquer modelo utilizando o sequenciamento direto de blocos. Para que seja possível solucionar os problemas, os métodos trabalham em um mecanismo de permuta automático, desse modo à medida que um algoritmo não consegue mais resolver o problema em questão outro algoritmo assume o problema.

## 2.5 SOFTWARE MICROMINE

O Micromine® é um *software* voltado para o planejamento de lavra comercializado pela empresa Micromine, que atua em mais de 90 países e há mais de 30 anos na área de mineração, sendo uma empresa reconhecida no mercado (MICROMINE, 2017).

O *software* é baseado na metodologia clássica, implementado com algoritmo de Lerchs e Grossmann e apresenta resultados bastante eficientes para o planejamento de lavra (MICROMINE, 2017).

Como ferramenta de otimização o Micromine® utiliza o *Pit Optimization*. Para dar início ao processo o software determina a cava final que contém o maior excedente não descontado entre receita líquida e custos operacionais totais, sem considerar restrições nem descontos de programação (MICROMINE, 2017).

Uma análise das cavas aninhadas é então utilizada para determinar a cava ótima. Essa análise é uma sequência de cavas finais geradas por incrementação do preço das *commodities* em torno de um preço base. A cava ótima representa o maior valor presente líquido possível, levando em consideração todas as restrições de programação (produtividade de produção e processamento anual), descontos e custos de capital recorrentes (MICROMINE, 2017).

A figura 11 apresenta uma análise realizada pelo software.

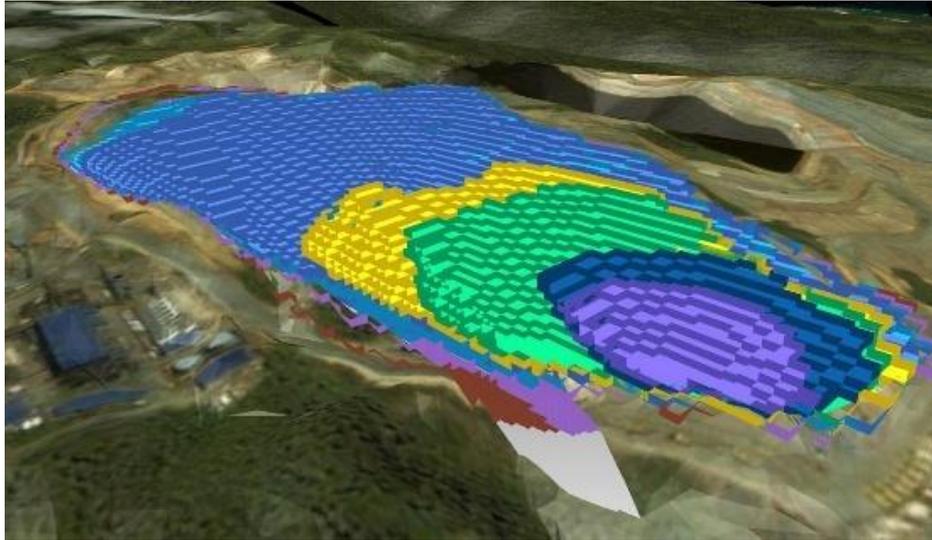


Figura 11: Um conjunto de poços aninhados é produzido usando diferentes parâmetros de otimização.  
Fonte: (MICROMINE, 2017).

## 2.6 SOFTWARE SIMSCHEDED

O Simdched® é um *software* brasileiro, desenvolvido pela empresa Mining Math Associates. Ele conta com uma nova tecnologia para sequenciamento direto de blocos, sendo possível executar um sequenciamento completo a partir de modelo de recursos. O *software* encontra uma sequência de lavra que busca maximizar o valor presente líquido (VPL) do projeto, unificando todas as etapas e otimizando todos os períodos simultaneamente, decidindo quais blocos serão lavrados, quando e qual o destino de cada um, a partir de um modelo de blocos importado (MINING MATH , 2015).

A figura 12 traz uma cava gerada pelo *software*.

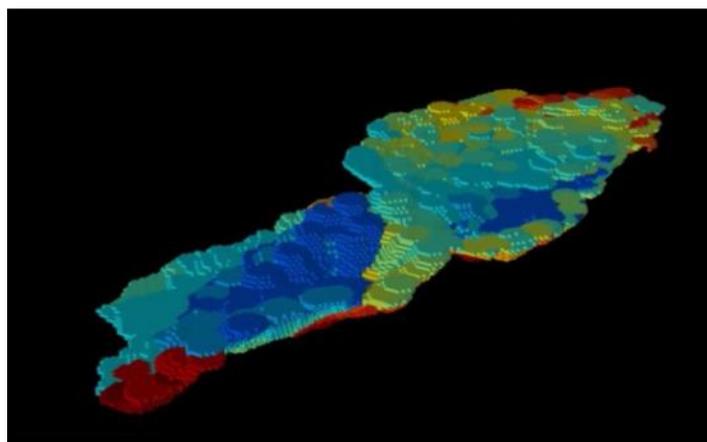


Figura 12: Resultados do sequenciamento realizado pelo SimSched.  
Fonte: (MINING MATH , 2015).

Mining Math (2015) afirma que diferentemente dos principais *softwares* presentes do mercado, o Simsched® não é baseado no algoritmo Lerchs Grossman, mas em técnicas de programação inteira mista com a adição de heurísticas proprietárias, sendo assim considerado um *software* de otimização de cava que utiliza conceitos inovadores (MINING MATH , 2015).

O *software* possui um algoritmo flexível, sendo possível inserir variáveis geométricas importantes, como, a largura mínima de fundo e taxas de avanço vertical, que podem ser configuradas de acordo com a situação, variando de acordo com o projeto em questão. É possível adicionar quaisquer restrições aditivas (produções, horas de equipamento, distâncias de transporte, etc.) e múltiplas restrições de blendagem, à medida que o produto for alcançando suas etapas planejadas de desenvolvimento (MINING MATH , 2015).

Seu modelo matemático faz uso de superfícies para controle preciso de aspectos geotécnicos, assim os planos gerados são próximos da realidade operacional da mina, o que implica em menores oscilações nos indicadores quando rampas são inseridas (MINING MATH , 2015).

Outra característica importante do Simsched® é que ele permite que problemas mais complexos sejam englobados em um único processo de otimização e que incertezas geológicas sejam consideradas simultaneamente, implicando em melhores decisões na lavra, controle e redução de riscos do empreendimento e aumento do valor do projeto (MINING MATH , 2015).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo apresentaremos a descrição do banco de dados, do modelo de blocos, e os métodos utilizados na análise tanto na otimização quanto no sequenciamento de lavra.

#### 3.1 BANCO DE DADOS

Para esse estudo foi utilizado um banco de dados modificado que representa uma reserva de minério de ferro localizada no "Quadrilátero Ferrífero", cujo mineral minério é a hematita. O banco de dados utilizado possui as seguintes características:

- Os teores de ferro, sílica, titânio, manganês, alumínio e fósforo;
- As densidades dos blocos, que variaram de 2,09 a 4,62 g/cm<sup>3</sup>;
- A localização espacial dos blocos;
- Dimensões dos blocos (20x20x10m);
- Além dessas informações criou-se um *rocktype*, que nesse caso recebeu uma codificação binária. Os blocos que continham algum teor de ferro foram identificados com o número um e os blocos sem a presença de ferro receberam zero como identificação.

#### 3.2 IMPORTAÇÃO DO MODELO DE BLOCOS

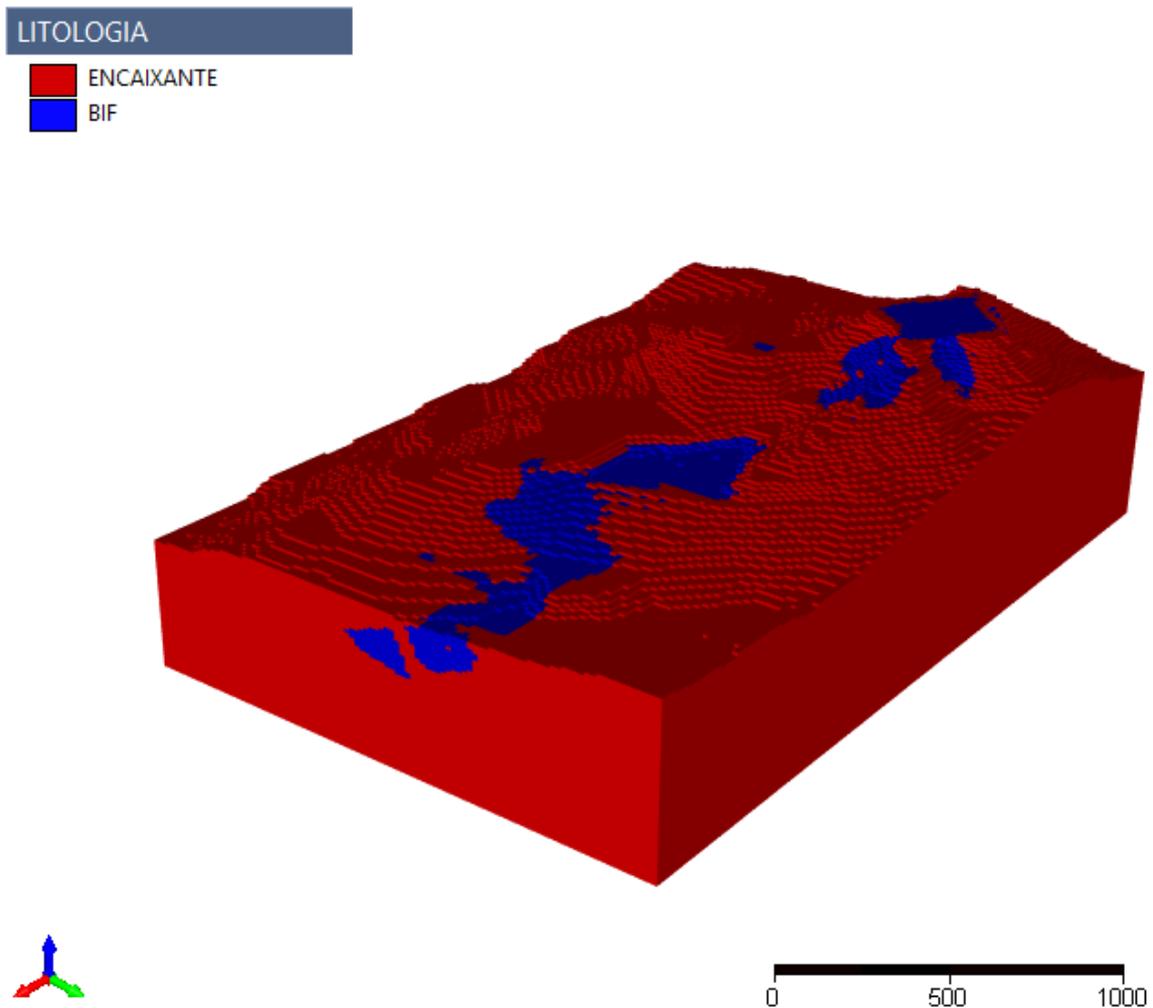
Nesse estudo foram utilizados dois *softwares* distintos de planejamento de lavra que apresentam suas próprias peculiaridades, mas ambos apresentam a possibilidade de importação e visualização do modelo de blocos.

O modelo de blocos foi fornecido juntamente com o banco de dados, em formato Excel®. Esse foi convertido para extensão de arquivo CSV e posteriormente importado para ambos os *softwares*. Os blocos presentes no banco de dados contêm 20x20x10m como dimensões nos eixos X, Y e Z, respectivamente e as unidades dos teores foram utilizadas em porcentagem. A tabela 1 abaixo descreve as características do modelo de blocos.

**Tabela 1: Características do Modelo de Blocos.**

Nº de Blocos	Dim. X (m)	Dim. Y (m)	Dim. Z (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Teor Médio Fe(%)
969.329	20	20	10	3.877.316.000	36,98

O modelo original apresenta subclassificações da litologia BIF (formação ferrífera bandada), mas para esse estudo houve uma simplificação de todas as litologias mineralizadas, uma vez que o agrupamento das litologias semelhantes não gera grandes complicações ao sistema. Essas sublitologias receberam uma codificação numérica e foram agrupadas na coluna *rocktype*. Portanto, o modelo de blocos é dividido em encaixantes e BIF, conforme mostrado na figura 13.



**Figura 13: Modelo de Blocos e Classificação Mineral.**

Na figura 14 é possível observar a variação dos teores de ferro representados nos blocos da litologia BIF cujos valores estão entre 0 a 69,1%.

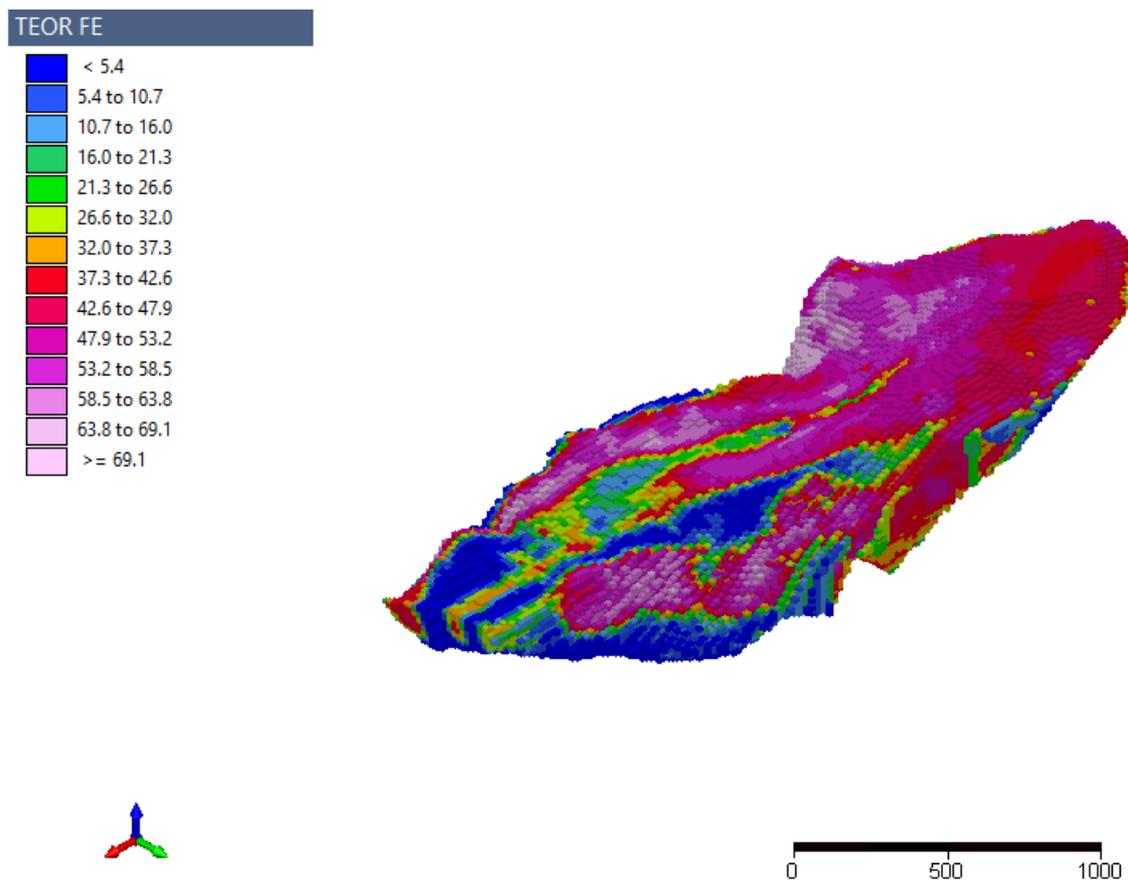


Figura 14: classificação dos blocos de minério de acordo com o teor de ferro – visão lateral do bloco.

### 3.3 PARAMETRIZAÇÃO DA RESERVA

Nesse estudo foram utilizados os mesmos parâmetros de entrada em ambos os softwares, Micromine® e Simsched®, deixando as diferenças obtidas nos resultados apenas em função das metodologias distintas de funcionamento do processo de otimização, tornando possível a comparabilidade nos resultados.

#### 3.3.1 METODOLOGIA CLÁSSICA

Para dar início ao processo de otimização foi utilizada a ferramenta *Pit Optimization* presente no Micromine®. Inicialmente foram preenchidos os campos presentes na aba *Model*, onde foi selecionado o modelo de blocos no qual ocorrerá a otimização. Posteriormente foi definida a correspondência das coordenadas X, Y e Z presente no modelo de blocos para que o *software* fizesse o reconhecimento. Como modo de seleção do destino do bloco foi selecionado a metodologia fluxo de caixa (*Cash flow*), portanto a decisão de lavar o bloco está relacionada a função benefício do bloco (figura 15).

Pit Optimisation Setup : OTIMIZACAO TIAGO

Model

- Mining
- Processing
- Defaults
- Pit Slopes
- Advanced

Input

Block model file: MODELO TIAGO

Type: DATA

Filter:

East field: EAST

North field: NORTH

Z field: RL

Density field: dens\_n

PCAF field:

MCAF field:

Factor field:

Slope angle field:

Model Type

Full

Ore body

DTM File

Type:

Name:

Use Custom Optimisation Limits

	Min	Max
East	<input type="text"/>	<input type="text"/>
North	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Z	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Ore Selection Method

Cut-off  Cash flow

Save and Close

Cancel

Forms

Figura 15: Formulário *Model* preenchido - *Pit Optimization*.

Foi utilizado o mesmo valor de custos de lavra (*Mining Costs*) para o minério e estéril, ambos com o mesmo valor de 2 \$/t. Para os parâmetros de lavra (*Mining Parameters*) foram definidos considerando diluição inexistente. Para litologia (*Rock Type*) foram atribuídos os valores da coluna *rocktype* presente no modelo de blocos. Nessa coluna todo material reconhecido como estéril é representado pelo número zero e material tido como minério pelo número um. Conforme é ilustrado na figura 16 a seguir.

Pit Optimisation Setup : OTIMIZACAO TIAGO

Model

- Mining
- Processing
- Defaults
- Pit Slopes
- Advanced

Mining Costs

Ore: 2 PER TONNE

Diluted and recovered

Waste: 2 PER TONNE

Mining Parameters

Dilution

Value: 0

Field:

Unit: PER CENT

Formula: WASTE/ORE

Recovery

Value: 1

Field:

Unit: FACTOR

Rock Types

Field name: rocktype

Rock Type	Rehabilitation Cost	RCAF
0	0 PER TONNE	1
1	0 PER TONNE	1

Save and Close

Cancel

Forms

Figura 16: Formulário *Mining* preenchido - *Pit Optimization*.

Diferentemente do software Simsched® em que a função benefício é importada juntamente com o modelo de blocos, no *Pit Optimization* essa função é calculada a partir da atribuição dos valores para os diferentes processos. Desse modo não há necessidade de que uma coluna no arquivo do modelo de blocos seja criada para a construção da função.

Posteriormente, foram atribuídos valores para o envio do minério já processado até o porto (*Selling Cost*) de 15\$/t, o preço de venda do minério (*Price*) igual a 70\$/t e o custo de processamento do minério (*Processing Costs*) de 6\$/t. Todos esses valores são mostrados na figura 17.

The screenshot shows the 'Pit Optimisation Setup : OTIMIZACAO TIAGO' window. On the left is a navigation tree with 'Processing' selected. The main area contains two tables:

Element	Grade Representation	Diluting Grade	Price	Unit	Selling Cost
ORE	Percentage (%)	70	70	\$/ Tonnes	15
fegl	Percentage (%)	0	0	\$/ Tonnes	
sigl	Percentage (%)	0	0	\$/ Tonnes	

Name	Rock Type	Processing Cost	General & Administration Cost	Element Parameters
BENEFICIAMENTO	1	6	0	ELEMENTOS

**Figura 17: Formulário *Processing* preenchido - *Pit Optimization*.**

A metodologia clássica requer uma análise de sensibilidade em relação ao valor do preço de venda minério para escolha da cava final baseado nas diferentes cavas geradas pela variação no preço. Sendo essa etapa parte do processo de otimização.

Para essa análise foi utilizado o preço de venda do minério de ferro igual a \$70 por tonelada. A partir desse preço foi utilizado um incremento (*increment*) de 0,1, isto é, uma variação do preço de venda do minério de 10% para cada cava. Para iniciar o processo a cava com valor de 100% foi tomada como base, ou seja, quando o valor de preço do minério permaneceu igual a \$70/t. A partir disso foi considerado que houve dois acréscimos e nove decréscimos no valor do preço de venda do minério. Desse modo, a cava número 12 representa uma cava cujo preço de venda do minério equivale

a 20% a mais do que a cava 10. Analogamente, a cava número 6 representa uma cava cujo preço de venda do minério equivale a 40% menos do que cava 10. Desse modo o preço de venda do minério na cava 12 e 6 valem 84\$/t e 42\$/t respectivamente.

Essa análise de sensibilidade foi feita no próprio *Pit Optimization* onde foi selecionada a opção *use revenue adjustment factors*. Assim, foi identificada a quantidade de períodos de variações do incremento e o valor do incremento (*increment*). A figura 18 ilustra os dados de entrada para a análise.

The screenshot shows the 'Pit Optimisation' software window. On the left is a tree view with 'Input', 'Nested Pits', 'Options', and 'Output' (containing Reporting, Pit Shell Points, Block Model Attributes, and Pit Shells). The main area is titled 'Nested Pits' and contains a checked checkbox 'Use revenue adjustment factors'. Below this is a table with three columns: 'From', 'To', and 'Increment'. The table contains one row with values 0.1, 1.2, and 0.1 respectively. Below the table is a 'Generate' checkbox (unchecked) and a 'Benches' text input field.

From	To	Increment
0.1	1.2	0.1

**Figura 18: Formulário *Nested Pits* preenchido – Análise de sensibilidade.**

Como resultados da análise de sensibilidade foram gerados dados para as 12 variações do preço do minério. Para facilitar a visualização da variação dos dados e auxiliar na tomada de decisão foram criados dois gráficos. Os gráficos representam a tonelage de estéril e minério de cada cava, assim como o valor do VPL. A partir da interpretação dos resultados obtidos uma cava foi selecionada para otimização e sequenciamento de lavra. A cava escolhida foi aquela com 50% do valor inicial, portanto, o valor do minério nessa cava é de \$35/t. O capítulo 4.1 contém a metodologia que justifica a escolha da cava de 50% do preço inicial.

A partir do resultado ótimo encontrado, foi feito o processo de sequenciamento de lavra. Para iniciar o processo foram definidas algumas restrições como ângulo do talude global igual 40°, tonelage de produção da usina de 50.000.000 toneladas por ano. Considerando que o valor total de toneladas de minério presente na cava é igual 1.242.160.116, assim respeitando a restrição da usina o sequenciamento será feito em 25 anos que foram subdivididos em 15 *push-backs*. A partir do resultado do

sequenciamento foi gerada a superfície da cava final, valor do presente líquido, etc. Essas informações serão apresentadas e discutidas no próximo capítulo.

### 3.3.2 SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS

Após a importação do modelo de blocos no Simsched®, o primeiro formulário a ser preenchido é o *General* que corresponde ao método de otimização. No presente trabalho foi utilizado o sequenciamento direto de blocos. Nesse formulário também foi definido o valor da densidade igual a 3,0 t/m<sup>3</sup>, taxa de desconto ao ano de 10% para cálculo do fluxo de caixa descontado e o valor do ângulo geral igual a 40° (figura 19).

The image shows a software interface for the 'General' settings of Simsched®. It includes the following fields and options:

- Optimization mode:** Radio buttons for 'Direct Block Scheduling' (selected) and 'Only Pit Optimization'.
- Densities (t/m<sup>3</sup>):** A dropdown menu set to 'dens\_n' and a text input field with the value '3'.
- Slope angles (degrees):** A dropdown menu set to '<none>' and a text input field with the value '40'.
- Economic parameters:** A text input field for 'Discount rate (%)' with the value '10'.
- Stockpiling (\$/t):** An unchecked checkbox.

Figura 19: Formulário *General* preenchido.

Em seguida definiram-se os possíveis destinos para os quais os blocos serão enviados, sendo a pilha de estéril ou usina de processamento. Cada destino foi identificado com seu respectivo campo contendo os valores econômicos. Em *Add Process* foi selecionado o destino dos blocos de minério definido como FB\_USINA e em *Add Dump* o destino dos blocos de estéril foi definido como FB\_PILHA. Essas funções econômicas são atributos presentes no modelo de blocos importado. Para os cálculos das funções foram utilizados os seguintes parâmetros, contidos na tabela 2:

Tabela 2: Parâmetros para cálculo das funções econômicas.

Parâmetros	
Preço do ferro (\$/t)	70
Custo de lavra de minério (\$/t)	2
Custo de lavra de estéril (\$/t)	2
Custo de transporte (\$/t)	15

<b>Custo de processamento (\$/t)</b>	6
<b>Recuperação do ferro (%)</b>	90

A função econômica é obtida da seguinte forma:

Para os blocos de estéril.

$$FB\_PILHA = -(MBLOCO * LCOST)$$

Onde:

FB\_PILHA: Valor econômico do bloco para envio para pilha de estéril;

LCOST: Custo de lavra de estéril;

MBLOCO: Massa do bloco.

Para os blocos de minério.

$$FB\_USINA = (MBLOCO * REC * FE\_PREÇO) - (PCUSTO * TCUSTO * LM\_CUSTO)$$

Onde:

FB\_USINA: Valor econômico do bloco para envio para usina;

LM\_COST: Custo de lavra minério;

MBLOCO: Massa do bloco;

REC: Recuperação;

FE\_PREÇO: Preço de venda do Ferro;

PCUSTO: Custo de processamento;

TCUSTO: Custo de transporte.

Os valores de recuperações para os materiais com destino a USINA receberam atributo igual a um e para os materiais da PILHA igual a zero. A figura 20 ilustra os passos descritos.

Name	Type	feq	sig	tgj	mng	aig	pgl	Economic value (\$)
1 USINA	process	1	1	1	1	1	1	FB_USINA
2 PILHA	dump	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	FB_PILHA

Recovery	mng	aig	pgl	Economic value (\$)
1	1	1	1	FB_USINA
0.00	0.00	0.00	0.00	FB_PILHA

Figura 20: Formulário *Destinations* preenchido.

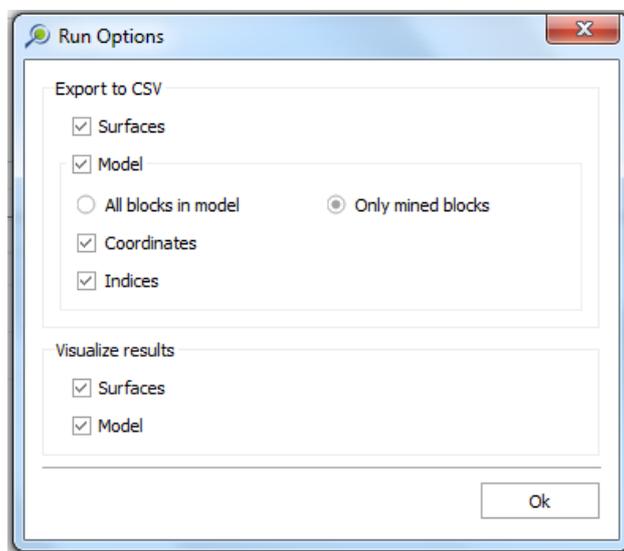
Após preencher as informações necessárias para a otimização do modelo de blocos é necessário indicar as restrições do processo. No campo *production/constraints* foi atribuída apenas restrição de produção da usina limitada a 50.000.000 toneladas, deixando a produção da pilha de estéril e o total de produção por período com valores ilimitados.

Já as restrições operacionais consideradas foram à largura mínima do fundo da cava (*Minimum bottom width*), e a largura mínima entre cavas que deverá ser respeitada para que a lavra da região seja economicamente viável (*Minimum mining width*), ambas com valores de 20 metros. Também foram informados os valores das taxas mínimas e máximas de avanço vertical da cava período a período (*Vertical rate of advance*) de 40 e 60 metros, respectivamente (figura 21).

Minimum width (m)		Vertical rate of advance (m)	
Mining:	20	Preferred:	40
Bottom:	20	Maximum:	60

Figura 21: Formulário *operational/constraints* preenchido.

Como última etapa foi feita a configuração dos arquivos que foram gerados pelo sequenciamento. No campo *Execution* foi selecionado a opção de exportar as superfícies geradas para cada período (*Surfaces*) e o modelo dos blocos minerados (*Mined blocks*) com as informações do sequenciamento, conforme é ilustrado a seguir (figura 22).



**Figura 22:** Campo *Run Options* destinado para configurar quais e como os arquivos serão exportados.

Depois de finalizar as etapas anteriores, foi iniciado o processo de sequenciamento direto de blocos. Como resultado desse processo o SimSched® gerou um relatório de cubagem diretamente no *software* Excel®. Também foi gerada a superfície da cava final e definida a quantidade de períodos em que foi feito o sequenciamento de lavra. Essas informações serão apresentadas e discutidas no próximo capítulo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos nas duas metodologias, como as geometrias das cavas, quantidade de material movimentado, quantidade de períodos em que foi feito o sequenciamento de lavra, assim como os valores de VPL.

### 4.1 OTIMIZAÇÃO DA CAVA FINAL

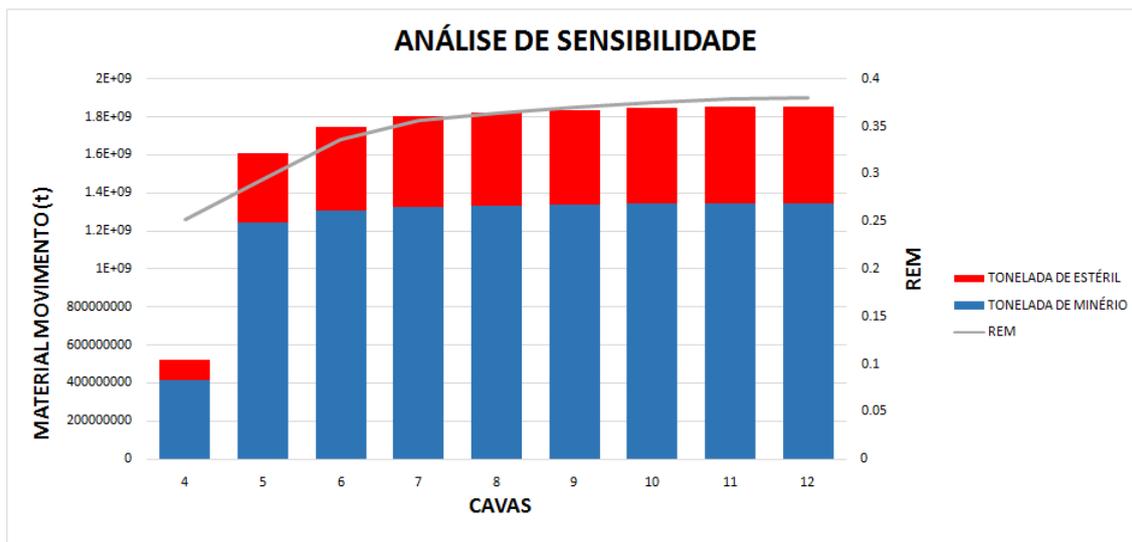
A metodologia baseada em Lerchs e Grossmann necessita de análise de sensibilidade para definição dessa cava ótima. A metodologia adotada pelo *software* Simsched® dispensa essa análise, ao contrário do que acontece no Micromine® onde o operador do projeto é responsável por essa fase, definindo assim a cava que será tomada para sequenciamento de lavra.

A tabela 3 indica os resultados obtidos na análise de sensibilidade feita no Micromine®, os parâmetros analisados foram: toneladas de minério e estéril movimentado em cada cava, REM e o valor presente.

Tabela 3: Resultados - Análise de Sensibilidade.

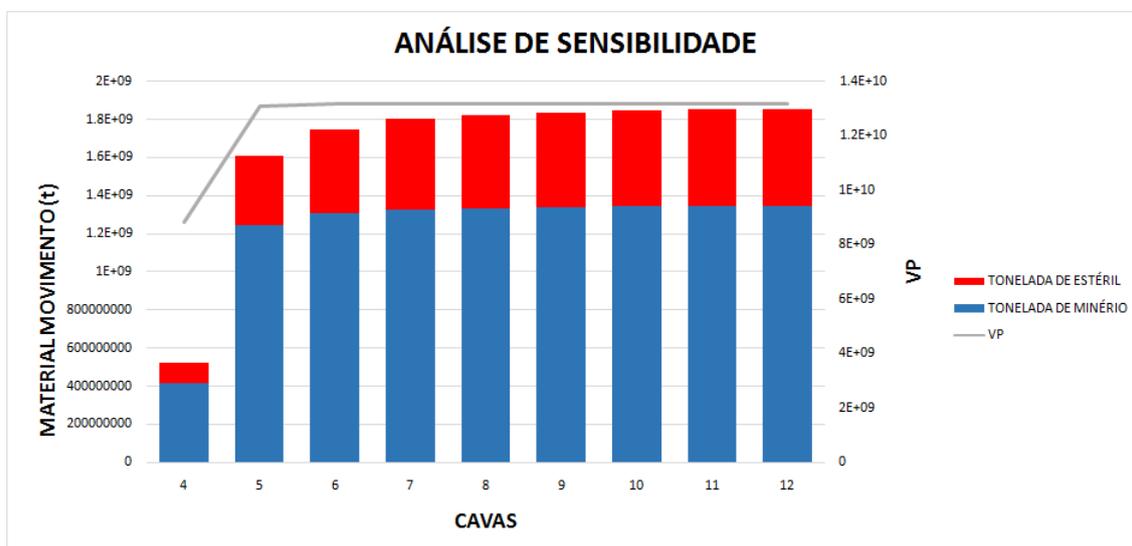
Cava	Minério (t)	Estéril (t)	REM	PV (\$)
4	$4,17 \times 10^8$	$1,05 \times 10^8$	0.25	$8,83 \times 10^9$
5	$1,24 \times 10^9$	$3,65 \times 10^8$	0.29	$1,30 \times 10^{10}$
6	$1,31 \times 10^9$	$4,39 \times 10^8$	0.33	$1,31 \times 10^{10}$
7	$1,32 \times 10^9$	$4,72 \times 10^8$	0.35	$1,31 \times 10^{10}$
8	$1,33 \times 10^9$	$4,86 \times 10^8$	0.36	$1,31 \times 10^{10}$
9	$1,34 \times 10^9$	$4,95 \times 10^8$	0.37	$1,31 \times 10^{10}$
10	$1,34 \times 10^9$	$5,03 \times 10^8$	0.37	$1,31 \times 10^{10}$
11	$1,34 \times 10^9$	$5,10 \times 10^8$	0.37	$1,31 \times 10^{10}$
12	$1,34 \times 10^9$	$5,11 \times 10^8$	0.38	$1,31 \times 10^{10}$

O gráfico da figura 23 demonstra a variação da quantidade de minério e estéril das nove possíveis cavas ótimas. Ao analisar o gráfico é notável que a partir da cava cinco não haja uma expressiva variação da tonelagem de minério produzido, o que varia é apenas a quantidade de material enviado para pilha de estéril. A cava 5 é a que apresenta o menor valor da REM.



**Figura 23: Tonelagem de minério e estéril em cada cava- Análise de Sensibilidade.**

Ao fazer a análise do gráfico da figura 24 é perceptível que a partir da cava cinco o valor do valor presente (VP) é praticamente constante. Portanto, a melhor cava para fazer o sequenciamento de lavra é a cava cinco, pois a partir dela não há uma variação grande no valor do VP e ela ainda apresenta uma quantidade de minério próxima das outras com uma quantidade de estéril menor, ou seja, apresenta um menor valor da relação estéril minério.



**Figura 24: Variação do valor de valor presente (VP) para cada cava - Análise de Sensibilidade.**

Para definição do tempo de vida da mina foi utilizado a fórmula de Taylor (1977) que se baseia na reserva determinada pela cava final. A tonelagem de minério esperada na cava gerada pro Micromine® foi de 1.242.160.116 t. Assim, foi obtido o tempo de vida da mina de 37,54 anos, com produção anual de 32,7 Mt por ano.

Como o corpo mineral é contínuo e próximo a superfície, foi utilizado para otimização da cava um fator de correção de 1,5. Pois o trabalho original de Taylor (1977) está relacionado a mineralizações disseminadas com cobertura maior que o presente depósito. Devido ao menor decapeamento decidimos aumentar a taxa de produção. O valor de produção anual de minério adotado após a correção são 50 milhões de toneladas e um tempo de vida da mina de 25 anos.

Após as otimizações das cavas foram os obtidos resultados representados na tabela 4 onde é feita a comparação entre os diferentes métodos utilizados. Foram constatados variações entre os parâmetros: tonelagem movimentada na usina e na pilha de estéril, VPL teor do minério e contaminante presente na usina.

**Tabela 4: Comparação entre as metodologias - Otimização de cava.**

Software (Metodologia)		Simsched (SDB)	Micromine (LG)	Var. (%)
<b>Tonelagem (Mt)</b>	<b>Minério</b>	949,96	1243,16	23,62
	<b>Estéril</b>	968,34	365,2	62,12
	<b>Total</b>	1917,30	1608,36	19,34
<b>VPL (M\$)</b>		11273,9	11219,10	0,48
<b>Teor (%)</b>	<b>Fe</b>	46,57	43,15	7,92
	<b>Si</b>	29,10	28,04	3,78

A figura 25 compara as diferenças geométricas das cavas geradas por cada metodologia em uma visão do topo.

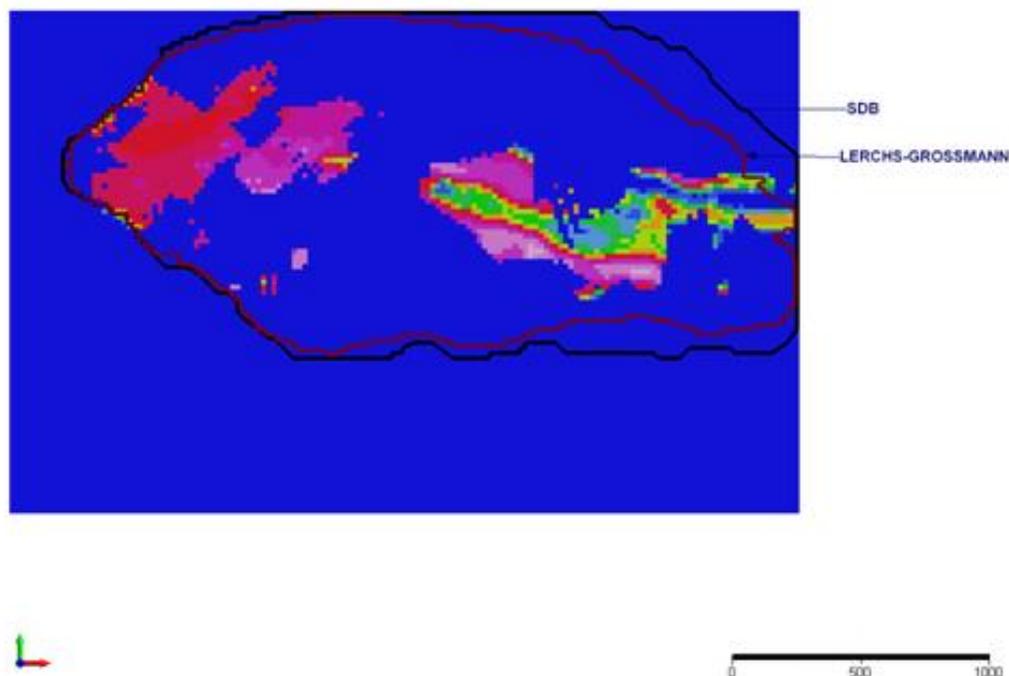


Figura 25: Limite Final de Cava entre as metodologias.

## 4.2 SEQUENCIAMENTO DE LAVRA

Quando comparamos o sequenciamento de lavra das duas metodologias é observada uma grande diferença. No software Micromine® o sequenciamento é dividido em fases de lavras ou *push-backs* que são definidas manualmente pelo engenheiro responsável pelo projeto. Portanto, fica nas mãos do engenheiro fazer uma análise detalhada a fim de definir a quantidade de fases e qual será a sequência ótima em que elas serão lavradas, buscando a combinação de maior retorno econômico. No Simsched® não existe essa divisão em fases de lavras, o sequenciamento é dividido apenas em períodos, que é definido pelo próprio programa.

O sequenciamento utilizando o Micromine® foi feito de maneira convencional. Inicialmente foi definida a quantidade de períodos que posteriormente foram divididos em fases. A partir da restrição imposta no projeto, no qual seria obrigatória uma movimentação de 50 milhões de toneladas de minério na usina por ano, foi definida a quantidade de períodos do empreendimento, fixado em 25 anos. Posteriormente foi definida a quantidade de *push-backs*, onde o maior valor presente líquido foi encontrado quando os períodos foram divididos em 15 fases. A figura 26 demonstra a delimitação da cava final dividida pela quantidade total de períodos em que será lavrada.

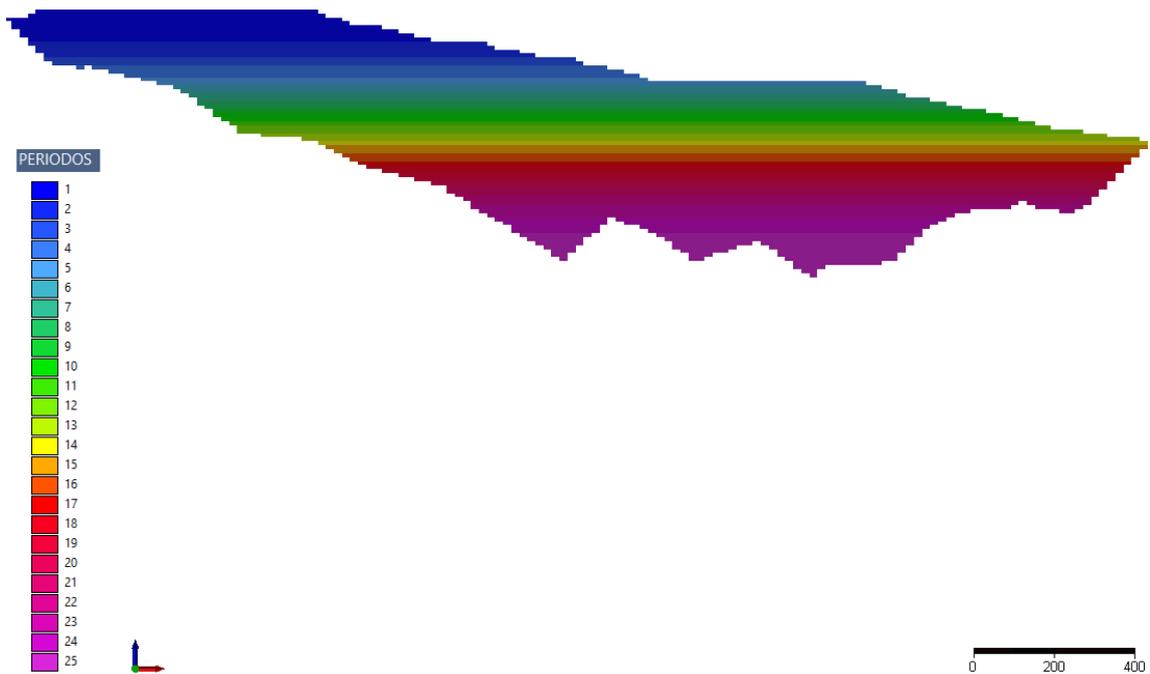


Figura 26:- Metodologia de LG - Cava final dividida em 25 períodos.

Para que fosse possível a comparação entre as metodologias, a mesma restrição foi imposta ao Simsched® para determinação da quantidade de períodos do sequenciamento de lavra. Por conseguinte, foi exigido que houvesse uma movimentação anual de 50 milhões de toneladas de minério na usina, ficando estabelecido que a exaustão do depósito fizesse em 19 períodos. A figura 27 ilustra a delimitação da cava, assim como a divisão do sequenciamento de lavra.

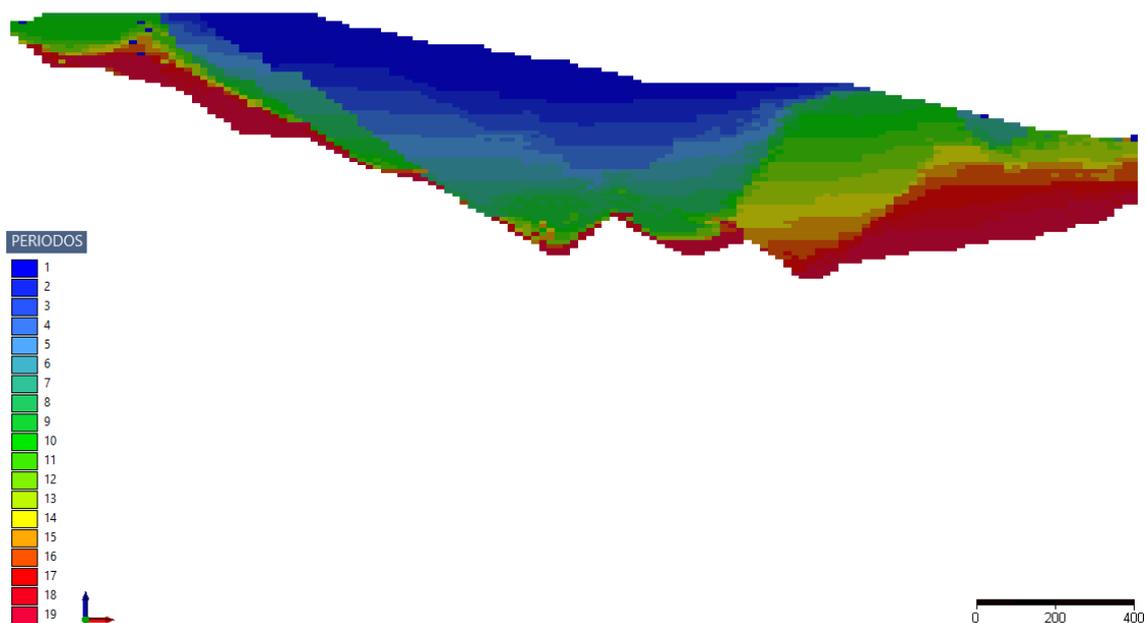


Figura 27: Metodologia de SDB- Cava final dividida em 19 períodos.

Ao comparar as cavas geradas pelos diferentes softwares é perceptível uma diferença na geometria das cavas. Outra diferença observável é como o sequenciamento de lavra foi feito.

Na metodologia de Lerchs e Grossmann foi gerado um sequenciamento do topo até a base em camadas, o resultado é um sistema de lavra com baixo aprofundamento de níveis. Pois há menor tendência ao aprofundamento para adiantar a lavra do minério mais rico. Desse modo nos primeiros períodos seriam lavradas as partes superiores e com o passar do tempo a profundidade da lavra foi aumentada, conforme ilustra a figura 26. A Figura 28 demonstra que há uma tendência de lavar a fração oeste do depósito inicialmente com baixo aprofundamento, porém não é resultado de um sequenciamento tipo “*worst case*”.

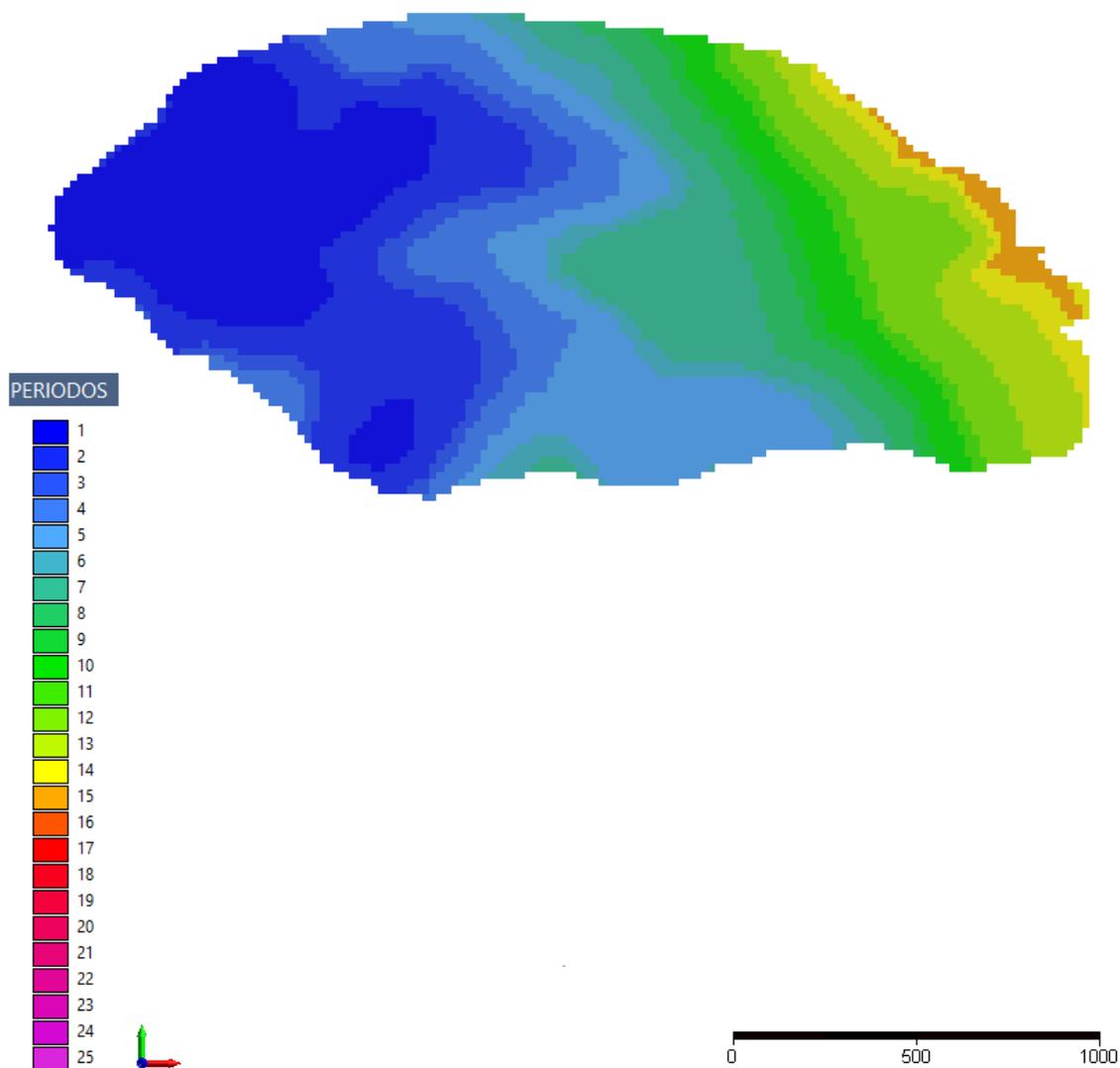


Figura 28:- Metodologia de LG - Cava final dividida em 25 períodos, Vista em planta.

Já no SDB o sequenciamento foi feito de maneira mais agressiva, nos primeiros períodos foram lavrados as porções do centro do corpo de minério de modo atingir grandes profundidades, gerando uma cava com ângulo geral mais acentuado. Posteriormente nos períodos mais avançados houve uma suavização desse ângulo, de modo que a lavra avançou para as extremidades laterais do corpo mineral, conforme mostrado na figura 27.

A tabela 5 e 6 indicam os resultados obtidos do sequenciamento de lavra em ambas as metodologias. Na tabela 5 são mostrados os seguintes parâmetros: quantidade massa em milhões de toneladas de minério e estéril movimentada, assim como a soma dos dois produtos produzidos em cada período.

**Tabela 5: Comparação entre os Métodos – Resultados obtidos com o Sequenciamento de Lavra.**

Simsched (SDB)			Períodos	Micromine (LG)		
Produção (Mt)				Produção (Mt)		
Minério	Estéril	Total	Minério	Estéril	Total	
50.00	141.79	191.79	1	50.00	9.06	59.06
50.00	91.54	141.54	2	50.00	13.97	63.97
50.00	70.90	120.90	3	50.00	15.02	65.02
50.00	54.53	104.53	4	50.00	17.43	67.43
50.00	43.40	93.40	5	50.00	21.24	71.24
50.00	35.67	85.67	6	50.00	24.73	74.73
50.00	36.45	86.45	7	50.00	17.16	67.16
50.00	30.91	80.91	8	50.00	16.20	66.20
49.99	37.79	87.78	9	50.00	16.66	66.66
50.00	55.21	105.21	10	50.00	17.98	67.98
50.00	57.27	107.27	11	50.00	19.38	69.38
50.00	57.58	107.58	12	50.00	21.25	71.25
50.00	50.43	100.43	13	50.00	23.45	73.45
50.00	43.24	93.24	14	50.00	24.24	74.24
50.00	37.22	87.22	15	50.00	22.43	72.43
49.99	35.95	85.94	16	50.00	19.98	69.98
50.00	39.63	89.63	17	50.00	15.92	65.92
50.00	35.61	85.61	18	50.00	13.79	63.79
50.00	13.20	63.20	19	50.00	11.24	61.24
			20	50.00	8.72	58.72
			21	50.00	6.39	56.39
			22	50.00	4.28	54.28

			<b>23</b>	50.00	2.70	52.70
			<b>24</b>	50.00	1.83	51.83
			<b>24</b>	50.00	0.18	42.34
			<b>25</b>	42.16	9.06	59.06

A única restrição imposta aos *softwares* para o sequenciamento foi a de produção de minério. Desse modo deixou-se livre a produção da pilha de estéril e a produção total. Não determinar a quantidade de estéril a ser lavrado objetivou verificar qual sistema era capaz de encontrar o minério rico primeiro, mesmo que levasse a grande retirada de estéril. Nos próximos tópicos será possível observar que mesmo com a maior quantidade de estéril lavrada dos primeiros períodos o valor econômico gerado por esta operação apresentou valores econômicos superiores a lavra com baixa quantidade de estéril. Conforme ilustra o gráfico da figura 29, há uma grande diferença entre a quantidade de material produzido para pilha de estéril em cada método.

No método de Lerchs e Grossmann a produção de estéril é baixa e constante durante todo o período de produção não ultrapassando o valor de 30 milhões de toneladas. No entanto, no método de SDB a produção de estéril nos primeiros períodos é muito grande, onde no primeiro período o valor ultrapassa 140 milhões de toneladas. A partir do período 5 o montante não superar mais o valor de 60 Mt, onde no final do empreendimento esse valor diminui ainda mais, conforme mostra o gráfico da figura 29.

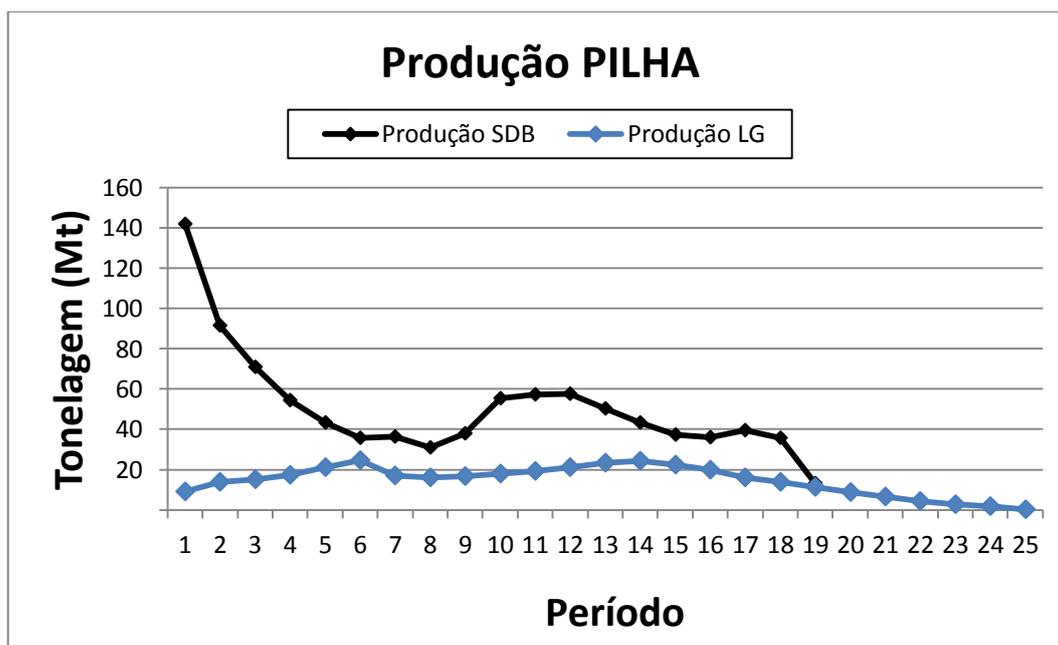


Figura 29: Produção pilha de estéril.

O gráfico da produção total se assemelha muito ao gráfico da produção da pilha de estéril, visto que esse valor é obtido pela soma das produções na pilha e usina. Assim o gráfico fica deslocado com valor de 50 milhões de toneladas, como é mostrado no gráfico da figura 30.

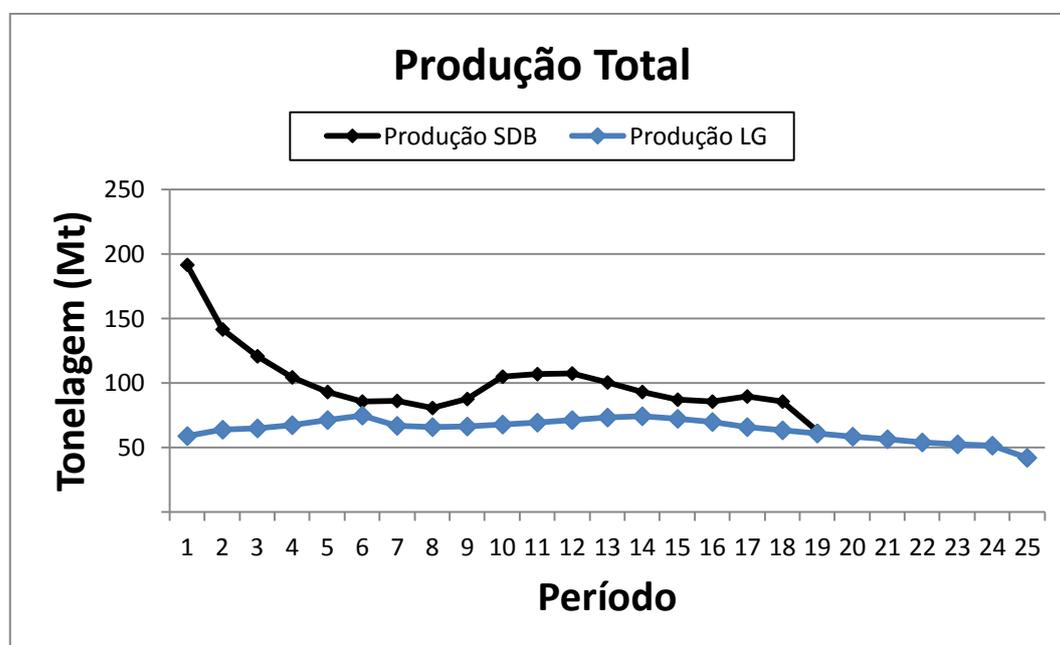


Figura 30: Produção total de material produzido.

Na tabela 6 são mostrados outros parâmetros obtidos a partir do sequenciamento, como: os teores médios de ferro e sílica, os valores em milhões de VPL e VPL acumulado para cada período.

Tabela 6: Comparação entre os Métodos – Resultados obtidos com o Sequenciamento de Lavra.

Simsched (SDB)				Períodos	Micromine (LG)			
% Fe Usina	% Si Usina	VPL.Ac (M\$)	VPL (M\$)		% Fe Usina	% Si Usina	VPL (M\$)	VPL.Ac (M\$)
55.54	17.86	1301.17	1301.17	<b>1</b>	44.81	34.49	1171.14	1171.14
53.35	20.77	1196.84	2498.01	<b>2</b>	44.93	33.10	1060.31	2231.46
52.81	21.57	1103.73	3601.74	<b>3</b>	45.71	31.60	984.71	3216.16
53.33	20.59	1039.17	4640.91	<b>4</b>	45.38	31.62	883.32	4099.48
53.51	20.54	962.806	5603.72	<b>5</b>	44.93	31.50	787.63	4887.11
50.32	24.75	815.513	6419.23	<b>6</b>	44.81	30.14	709.43	5596.54
47.59	27.46	687.192	7106.42	<b>7</b>	44.64	28.08	649.34	6245.88
48.07	24.93	638.46	7744.88	<b>8</b>	43.82	26.74	576.65	6822.54
46.87	25.36	555.155	8300.04	<b>9</b>	42.71	26.87	506.00	7328.54
45.04	30.28	464.351	8764.39	<b>10</b>	42.22	27.18	451.70	7780.24

45.02	30.27	420.487	9184.88	<b>11</b>	41.84	27.37	404.58	8184.83
44.23	31.55	372.438	9557.31	<b>12</b>	42.07	26.91	369.37	8554.19
43.87	32.73	338.748	9896.06	<b>13</b>	42.03	25.43	334.11	8888.30
42.17	35.47	294.754	10190.8	<b>14</b>	42.35	24.57	306.55	9194.85
41.61	36.53	265.71	10456.5	<b>15</b>	42.17	24.53	277.90	9472.76
41.42	36.72	240.524	10697.1	<b>16</b>	42.53	24.76	256.64	9729.40
40.46	38.49	209.986	10907	<b>17</b>	42.23	24.33	232.67	9962.07
40.37	39.02	191.686	11098.7	<b>18</b>	42.95	24.11	217.25	10179.32
39.33	38.07	175.15	11273.9	<b>19</b>	43.20	24.02	199.90	10379.22
				<b>20</b>	43.14	24.72	182.12	10561.34
				<b>21</b>	43.06	25.98	165.76	10727.09
				<b>22</b>	42.64	26.88	149.24	10876.34
				<b>23</b>	41.87	29.55	132.77	11009.11
				<b>24</b>	40.70	32.43	116.36	11125.47
				<b>25</b>	42.11	34.15	93.63	11219.10

O gráfico da figura 31 compara o teor médio alimentado na usina em cada metodologia. No método de LG o teor médio permanece praticamente constante, ficando na faixa de 40 a 50%. Já o teor médio no SDB é consideravelmente maior, nos 6 primeiros períodos os valores permanecem superiores a 50%. Os valores no SDB mantêm-se superiores aos valores do LG até o período 14.

Essa diferença considerável entre as metodologias se justifica pelo fato de que o SDB é um método mais agressivo. Desse modo, essa metodologia busca lavar primeiro os blocos mais ricos, com isso a usina é alimentada nos períodos iniciais com teores mais altos, buscando maximizar o VPL do empreendimento. Os maiores teores lavrados nos períodos iniciais ocasionaram em uma maior movimentação de estéril, como mostrado na figura 29. A figura 27 que mostra a geometria deste maior avanço vertical.

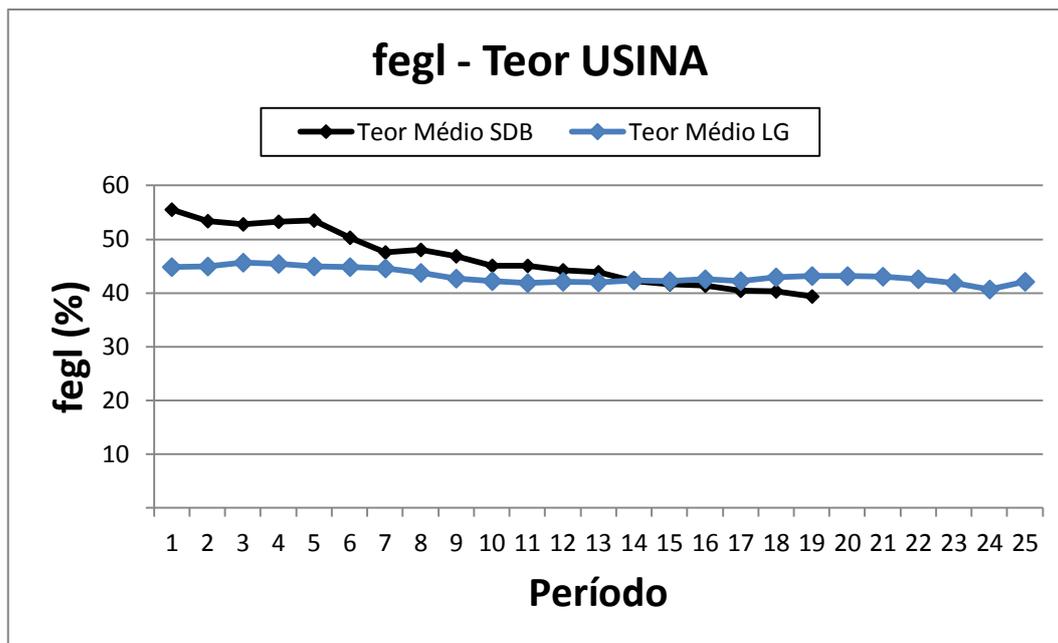


Figura 31: Teor médio de ferro alimentado na usina.

A sílica é considerada um contaminante do minério de ferro, portanto sua existência na usina é um fator prejudicial para o processamento do minério de ferro. Assim é desejável que a usina seja alimentada com menos quantidade possível desse material.

O gráfico da figura 32 ilustra como o teor médio de sílica varia em cada período de acordo com cada metodologia. No método de Lerchs e Grossmann o teor desse material não oscila muito com o decorrer dos períodos, variando entre 35 a 24%. No método do sequenciamento direto de blocos essa variação é maior, ficando entre 40 a 17%. Outra grande diferença entre as metodologias é que nos primeiros períodos enquanto o teor médio de sílica é maior no método de LG, no SDB é o inverso, ou seja, os teores são baixos. Portanto, o SDB procura lavar blocos mais ricos no começo do empreendimento, com teores mais altos de ferro e conseqüentemente teores mais baixos de contaminante.

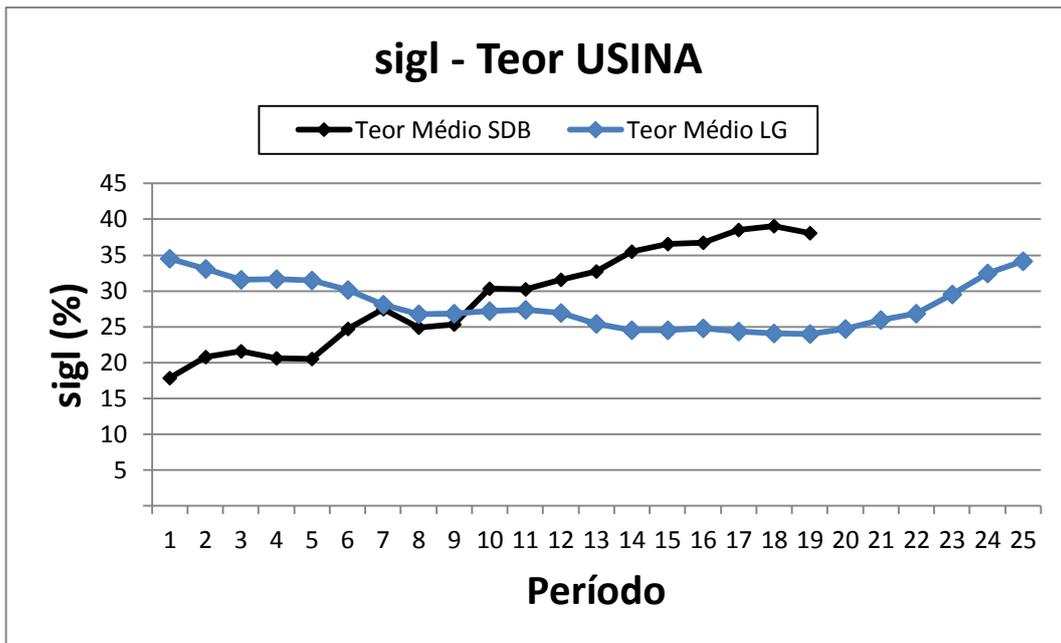


Figura 32: Teor médio de sílica alimentado na usina.

Em relação ao VPL é observável, de acordo gráfico da figura 33, que a metodologia do sequenciamento direto de blocos apresenta valores superiores nos primeiros períodos quando comparada com o método de Lerchs e Grossmann. Somente a partir do 13º período o método de LG supera o SDB em relação ao valor do VPL. Desencadeando diferença nas geometrias das cavas, valores de massa movimentada na pilha de estéril e dos teores médios da alimentação da usina.

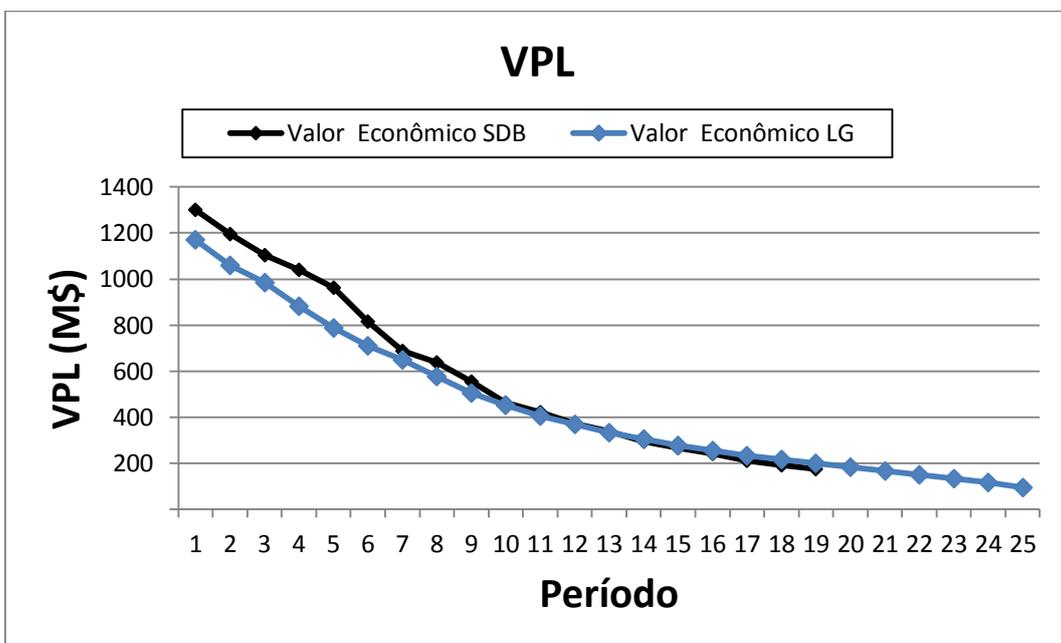


Figura 33: Comparativo entre os VPL do Lerchs-Grossmann e SDB.

Em relação ao valor do VPL acumulado, o SDB apresenta um valor ainda pequeno, mas superior ao LG. Essa diferença equivale a 0,48%, totalizando um montante de \$58,4 milhões. É notório também, que enquanto o sequenciamento direto de blocos finaliza o empreendimento em 19 períodos, cujo NPV acumulado no último período equivale a \$11273.9 milhões, o método de LG no mesmo período, ou seja, 19º teria um montante igual a \$10379.22 milhões, logo essa diferença equivale a 7,93%. Conforme, ilustrado no gráfico da figura 34.

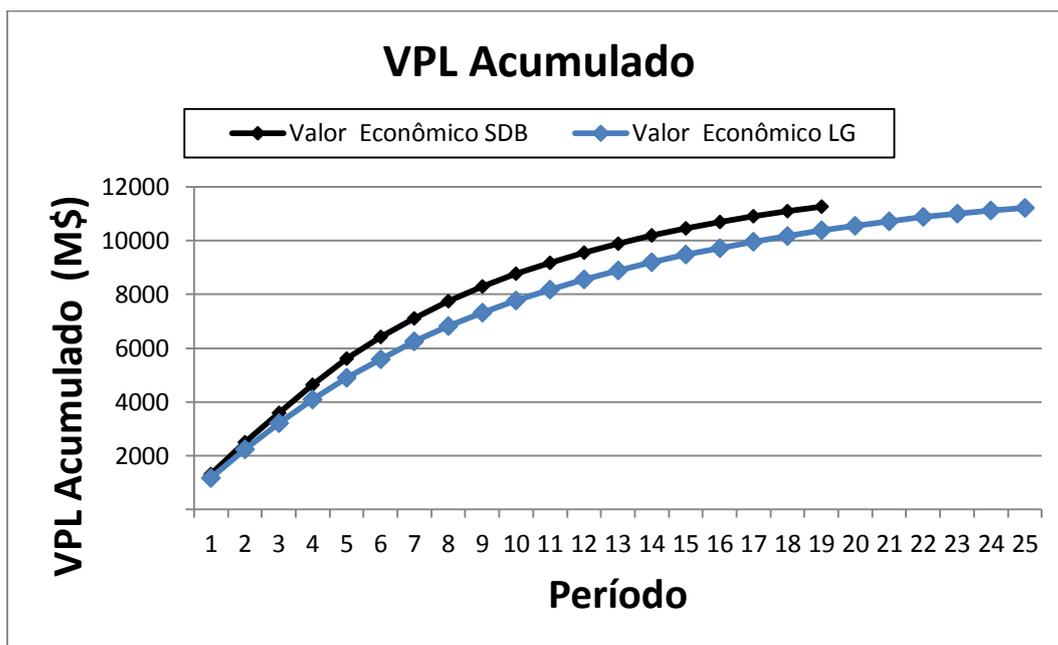


Figura 34: Comparativo entre os VPL acumulados do Lerchs-Grossmann e SDB.

## 5 CONCLUSÃO

O principal objetivo desse trabalho foi fazer a comparação entre diferentes métodos de cálculo de cava final. Como ferramenta desse estudo foram utilizados dois *softwares* de planejamento de lavra baseados em metodologias distintas, nos quais foram utilizados o mesmo banco de dados e os mesmos parâmetros de entrada.

Em termos do valor de VPL é interessante notar que não houve uma grande variação entre as duas metodologias, apesar do método por SDB apresentar um valor de VPL total superior de 0,48 % em relação à metodologia clássica. Em relação ao sequenciamento de lavra, conclui-se que o Simsched® executa essa etapa em menos períodos quando comparado ao Micromine®. Dessa forma o Simsched® se mostra mais atraente, pois além de apresentar um valor NPV superior, há também uma recuperação do investimento feito no empreendimento mineiro em menos tempo.

Ao analisarmos as geometrias das cavas geradas pelos dois *softwares*, existe uma grande diferença, principalmente nos primeiros períodos. O SDB é capaz de lavar blocos mais ricos nos períodos iniciais de modo a garantir maior voracidade ao sistema. No SDB há uma grande movimentação de estéril nos períodos iniciais, e a lavra é feita no sentido vertical enquanto que no método de Lerchs e Grossmann a lavra é feita em camadas horizontais. Em termos de movimentação total de estéril, o SDB apresenta um valor 62,12 % superior ao LG, pois é capaz de analisar o custo de oportunidade de lavar maior quantidade de estéril.

Essa disparidade é justificada pela diferença dos algoritmos utilizados em cada metodologia. O SDB é baseado em algoritmos de programação inteira mista, que são algoritmos que conseguem adiantar a lavra de blocos minério de alta qualidade para os períodos iniciais, maximizando o VPL.

## 6 REFERÊNCIAS

- Almeida, A. M. (2013). **Surface Constrained Stochastic Life-of-Mine Production Scheduling**. McGill University, Montreal, Quebec, Canada.
- Amaral, M. d., & Pinto, L. R. (Agosto de 2009). **Planejamento de Operações de Lavra em Minas a Céu Aberto com Alocação de Equipamento de Carga e de Transporte**. *XLIIABPO*, p. 1177-1188.
- Araújo, F. C. (2008). **Planejamento Operacional de Lavra com Alocação Dinâmica de Caminhões: Abordagens Exata e Heurística**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, p. 135.
- Candido, M. t. (2012). **Impacto de Diferentes Algoritmos e Geometria de Depositos Mineraiis no Planejamento de Longo Prazo**. Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgica e dos Materias-PPGEM - Universidade Federal do Rio Grande do Sul Rio Grande do sul, Rio Grande do Sul , p. 82.
- Carmo, F. A. (2001). **Metodologias para o Planejamento de Cavas Finais de Minas a Céu Aberto Otimizadas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Flores, B. A., & Cabral, I. E. (Outubro de 2008). Análise de sensibilidade na otimização econômica de uma cava. **Revista Escola de Minas**, 61(4°), p. 449-454.
- Guimarães, O. R. (2007). **Aplicação de algoritmos genéticos na determinação de cava final e sequenciamento de lavra em minas a céu aberto**. Tese de Mestrado- Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Guimarães, O., & Marinho, A. (2014). **Sequenciamento Direto de Blocos**. 8 th Brazilian Congress of Surface Mining, Belo Horizonte, Brasil.
- Hartman, H. L., & Mutmanský, J. M. (1987). **Introductory Mining Engineering** (2° Edição ed.). JOHN WILEY & SONS, INC.
- Hustrulid, W. A., & Kuchta, M. (2013). **Open Pit Mine Planning and Design**. (2° ed., Vol. 1). Londres: FUNDAMENTALS.
- LERCHS, H; GROSSMANN, I.F. (1965). **Optimum Design of Open Pit Mines**. (Vol. 58). Canadá: Transactions.
- MICROMINE*. (2017). Acesso em 16 de Maio de 2017, disponível em MICROMINE: <https://www.micromine.com/>

- MINING MATH* . (2015). Acesso em 8 de Novembro de 2016, disponível em SimSched: <http://www.simsched.com/?lang=pt>
- Peroni, R. d. (2002). **Análise da Sensibilidade do Sequenciamento de Lavra em Função da Incerteza do Modelo Geológico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.
- Pinto, C. L., & Dutra, J. I. (Setembro de 2008). **Introdução ao Planejamento e Operação De Lavra**. Universidade Corporativa Chemtech, Belo Horizonte, MG.
- SME-AIME. (1990). **Surface Mining** (2º Edição ed.). (B.A.Kennedy, Ed.) Colorado USA: Society for Mining Metallurgy and Exploration SME.
- SME-AIME. (2011). **SME Mining Engineering Handbook**(3º Edição ed., Vol. 1). (P. Darling, Ed.) Colorado USA: Society for Mining Metallurgy and Exploration SME.
- SOUZA, F. R. (2016). **Sequenciamento Direto de Blocos: Impactos, Limitações e Benefícios operacionais ao Planejamento de lavra**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.